

Schlussbericht GeReLEO

Förderkennzeichen 50YB0907

Projekt- und Dokumentinformationen

Projektinformationen	
Verbundprojekt	GeReLEO – GEO Datenrelais für niedrigfliegende Satelliten
Auftraggeber	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Projektträger	DLR Raumfahrtmanagement
Förderkennzeichen	50YB0907
DLR-Kostenträger	3001747
Projektlaufzeit	1.10.2009 bis 30.11.2012 (38 Monate)
Projektkoordinator	Anton Donner
Projektpartner	DLR-Institut für Kommunikation und Navigation, Oberpfaffenhofen EADS Innovation Works, Ottobrunn Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme, Chemnitz SINTEC Microwave Systems GmbH, Böblingen Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt Technische Universität München, Lehrstuhl für Kommunikation und Navigation

Dokumentinformationen	
Editor	Anton Donner
Sicherheit	öffentlich
Version	1.1

Freigabe

Aktion	Name/Unterschrift	Organisation	Datum
Erstellt von	Anton Donner et al.	DLR-KN	27.02.2013
Geprüft von	Dr. Achim Dreher	DLR-KN	27.02.2013
Produktsicherung	Barbara Steude	DLR-KN	27.02.2013
Freigegeben von	Dr. Hermann Bischl	DLR-KN	13.02.2013
Freigegeben von	Dr. Achim Dreher	DLR-KN	27.02.2013

Autoren

Name	Organisation	Kontakt
Dr. Hermann Bischl	DLR-KN	E-Mail: hermann.bischl@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2884
Anton Donner	DLR-KN	E-Mail: anton.donner@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2883
Dr. Achim Dreher	DLR-KN	E-Mail: achim.dreher@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2314
Wahid Elmarissi	DLR-KN	E-Mail: wahid.elmarissi@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2340
Stefan Erl	DLR-KN	E-Mail: stefan.erl@dlr.de Telefon: +49 8153 28 3367
Dr. Lukasz Greda	DLR-KN	E-Mail: lukasz.greda@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2349
Zoltán Katona	DLR-KN	E-Mail: zoltan.katona@dlr.de Telefon: +49 8153 28 2854
Andreas Winterstein	DLR-KN	E-Mail: andreas.winterstein@dlr.de Telefon: +49 8153 28 3567

Änderungsnachweis

Version	Datum	Name	Änderungen
0.0	31.10.2012	Anton Donner	Erste Version
0.1	23.11.2012	Andreas Winterstein	Abschnitt "Digitale Hardware" eingefügt
0.2	30.11.2012	Andreas Winterstein	Kalibrierung ergänzt, Literaturverweise hinzugefügt
0.3	07.12.2012	Andreas Winterstein	Update der Bilder von Platinen und GUI
0.4	11.02.2013	Anton Donner	Überarbeitung von Kapitel 2, diverse Korrekturen
0.5	26.02.2013	Anton Donner	Formale Korrekturen
1.0	26.02.2013	Lukasz Greda	Letzte inhaltliche Verbesserungen
1.1	03.04.2013	Andreas Winterstein	Korrektur Microstrip-Technologie

Vorbemerkung und Danksagung

Das GeReLEO Projekt wurde vom Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter den Förderkennzeichen 50YB0907 bis 50BY0912 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Dieser Schlussbericht beschreibt die Arbeiten des DLR-Instituts für Kommunikation und Navigation und ist nicht als abschließender Bericht für die Ergebnisse des gesamten Verbunds zu verstehen.

An dieser Stelle möchten wir uns bei unseren Verbundpartnern, den Unterauftragnehmern und dem Systemhaus Technik des DLR ganz herzlich für die hervorragende Zusammenarbeit bedanken.

Besonderer Dank gilt unseren Kolleginnen und Kollegen vom DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, die trotz mehrfacher Terminverschiebungen für uns die Vermessungen des Antennenreflektors durchführen konnten.

Das DLR Raumfahrtmanagement hat uns in den vergangenen drei Jahren außerordentlich kompetent und hilfreich begleitet, wofür wir uns ebenfalls herzlich bedanken möchten.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	13
1.1	Aufgabenstellung	13
1.2	Voraussetzungen	15
1.2.1	TT&C Relais für Satelliten-Missionen im niedrigen Erdorbit	15
1.2.2	Nutzlastdaten Relais für Satelliten-Missionen im niedrigen Erdorbit	16
1.2.3	Notwendigkeit mehrerer Datenverbindungen zu verschiedenen Low Earth Orbit (LEO) Satelliten	16
1.3	Planung und Ablauf	17
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	17
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	20
1.5.1	Verbundpartner	20
1.5.2	Unterauftragnehmer und Anwender	22
2	Eingehende Darstellung	23
2.1	Ausführlicher Ergebnisbericht	23
2.1.1	Mehrfachzugriff und kanaladaptive Übertragungsverfahren	23
2.1.2	Multibeam-Antennensystem	31
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	47
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	48
2.4	Voraussichtlicher Nutzen	48
2.4.1	Wissenschaftlicher Nutzen	48
2.4.2	Wirtschaftlicher Nutzen	48
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt	49
2.6	Erfolge und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	49
2.6.1	Erfolge Veröffentlichungen	49
2.6.2	Präsentationen und Messen	51
2.6.3	Diplom- und Masterarbeiten	51
2.6.4	Geplante Veröffentlichungen	51
	Abkürzungsverzeichnis	52

Literaturverzeichnis

55

Abbildungsverzeichnis

1.1	Szenario niederratiges bidirektionales Datenrelais.	13
1.2	Szenario hochratiges unidirektionales Datenrelais.	14
1.3	Zeitablauf-Diagramm des Projekts.	18
1.4	Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) Protokoll Architektur und GeReLEO Neuentwicklungen.	19
2.1	Systemarchitektur und die verwendeten Mehrfachzugriffsverfahren.	24
2.2	Protokollstapel für den hochratigen Link [Kat12a].	24
2.3	Field Programmable Gate Array (FPGA) Board für die physikalische Schicht.	29
2.4	Schematische Darstellung des Demoaufbaus.	29
2.5	Demonstration der Datenübertragung.	30
2.6	Reflektoranordnungen.	31
2.7	Arraygespeiste Offset Reflektorantenne.	32
2.8	Konzept der Multibeam-Antenne mit digitaler Strahlformung.	33
2.9	Kalibrierverfahren.	34
2.10	Demonstrationssystem.	35
2.11	Hochdirektive Patchantenne mit Stacked-Patch Architektur und einem Via-Zaun.	36
2.12	Messungen der Patch-Antennen.	36
2.13	Vergleich zwischen Simulationen und Messungen für zwei Patchantennen-Architekturen.	37
2.14	Strahlungsdiagramme einer Beispielkonfiguration mit $D=120$ cm, $f=180$ cm, Offset-Winkel von 25° . Speisung mit 4×4 Subarrays. Keine Überlappung zwischen Subarrays.	38
2.15	Strahlungsdiagramme einer Beispielkonfiguration mit $D=120$ cm, $f=180$ cm, Offset-Winkel von 25° . Speisung mit 4×4 Subarrays. Überlappung zwischen 2×2 Subarrays.	39
2.16	Fertigung des 4×4 Multifeed-Arrays für das Demonstrationssystem.	39
2.17	Gemessener Gewinnverlauf zweier Elemente des 4×4 Multifeed-Arrays.	40
2.18	Raumfahrttauglichkeitstests.	40
2.19	Vermessung des Reflektors für das Demonstrationssystem.	41
2.20	Foto des Demonstrationssystems.	42
2.21	Übersicht über die digitale Hardware mit Schnittstellen.	43
2.22	Flussdiagramm des Signalverarbeitungspfades.	43

2.23 Platinen für die Befehlsübermittlung zwischen FPGA und Antennensystem.	45
2.24 Fenster der grafischen Benutzungsoberfläche.	46

Tabellenverzeichnis

2.1	Modulation und Codierungs (ModCods) für den niederratigen Link.	27
2.2	ModCods für den hochratigen Link.	27
2.3	Bewilligte Positionen laut Zuwendungsbescheid vom 28.09.2009 und tatsächliche Ausgaben (jeweils in Euro).	47

Kapitel 1

Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

In diesem Vorhaben wurden insbesondere bessere, d.h. bandbreiteneffizientere und gleichzeitig robustere Übertragungsverfahren für niederratige und hochratige Geostationary Earth Orbit (GEO) Datenrelais, ein Zugriffsverfahren zur gleichzeitigen Unterstützung niederratiger bidirektionaler GEO Datenrelais, und eine innovative Multibeam-Empfangsantenne mit mehreren individuell elektronisch nachführbaren Beams für den hochratigen unidirektionalen Download von Daten mehrerer LEO Satelliten entwickelt. Alle Entwicklungen wurden für das Ka-Band durchgeführt. Eine abschließende Demonstration verifizierte die erarbeiteten Konzepte und Neuentwicklungen.

In Abbildung 1.1 ist das Prinzip eines niederratigen bidirektionalen Datenrelais für mehrere LEO Satelliten dargestellt. Hierfür ist auf dem GEO Satelliten eine globale Empfangsantenne notwendig. Im Projekt wurde für dieses Szenario ein Zugriffsverfahren entwickelt.

Abbildung 1.2 zeigt die Anwendung eines hochratigen, unidirektionalen Datenrelais für mehrere LEO Satelliten. Wegen der hohen Datenraten sind auf dem GEO Satelliten nachgeführte Emp-

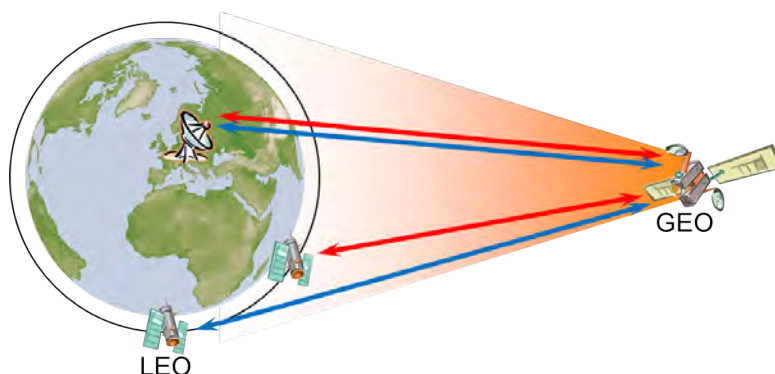


Abbildung 1.1: Szenario niederratiges bidirektionales Datenrelais.

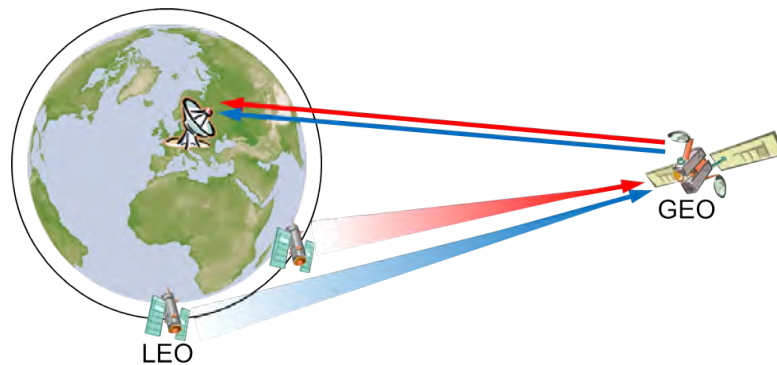


Abbildung 1.2: Szenario hochratiges unidirektionales Datenrelais.

fangsbeams mit hohem Antennengewinn erforderlich. Die dafür benötigte neuartige Multibeam-Empfangsantenne wurde ebenfalls in diesem Vorhaben entwickelt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Datenübertragung im Ka-Band nicht als Konkurrenz zur optischen Datenübertragung mit ihren wesentlich höheren erzielbaren Datenraten zu sehen ist. Vielmehr eignet sich dieses Systemkonzept insbesondere für LEO Satelliten kleiner Bauart mit geringer Masse und beschränkter elektrischer Leistung.

Mögliche Anwendungsgebiete dieser Entwicklungen sind beispielsweise:

- Niederratiges Telemetry, Tracking and Command (TT&C) für 10 bis 15 kleine LEO Satelliten (Bedarf German Space Operations Center (GSOC)).
- Hochratige Datenübertragung für die Erdbeobachtung mit mehreren LEO-Satelliten (Bedarf Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)).

In beiden Szenarien sind die Linkeigenschaften aufgrund der Bewegung der LEO Satelliten, der Beamkontur, und der Regendämpfungen (Link zwischen Bodenstation und GEO Satellit) zeitlich veränderlich. Deswegen mussten kanaladaptive Übertragungsverfahren entwickelt werden, die die Übertragungskanäle zu jeder Zeit optimal ausnutzen.

Die beiden wesentlichen Aufgabenstellungen in diesem Vorhaben waren somit wie folgt:

Neue Systemkonzepte und Übertragungsverfahren für GEO Datenrelais für niedrigfliegende Satelliten sollten entwickelt und demonstriert werden. Insbesondere sind neue Zugriffsverfahren (Datenübertragungsprotokoll) notwendig, mit denen niederratige (z.B. TT&C) Datenverbindungen für mehrere LEO Satelliten gleichzeitig bedient werden können. Des Weiteren werden neue kanaladaptive Übertragungsverfahren für die hochratigen unidirektionalen Datenlinks benötigt, mit denen der Datendurchsatz und die Robustheit bei zeitlich veränderlichen Übertragungsbedingungen erhöht werden kann.

Die zweite Kernaufgabe war die Entwicklung einer neuartigen *Multibeam-Empfangsantenne* mit individuell zu mehreren LEO Satelliten nachführbaren Beams als Labormuster für die hochratigen Datenverbindungen. Diese neuartige Antenne besteht aus einem starren Antennenreflektor, kom-

biniert mit einem elektronisch gesteuerten Array als Feed und mit digitaler Strahlformung. Größter Wert wurde dabei auf geringe Komplexität bei guter Leistungsfähigkeit gelegt.

Die Ergebnisse des Vorhabens sind auf eine spätere Implementierung in nationalen Satellitenmissionen ausgerichtet.

1.2 Voraussetzungen

In den folgenden Abschnitten folgt eine Analyse des Bedarfs und der daraus abgeleiteten Anforderungen an GEO Datenrelais.

1.2.1 TT&C Relais für Satelliten-Missionen im niedrigen Erdorbit

Durch das GSOC werden gegenwärtig fünf Satelliten im niedrigen Erdorbit betrieben. Dabei handelt es sich um die Satelliten CHAMP, BIRD, GRACE 1 und 2, sowie TerraSAR-X. Drei weitere Missionen für den niedrigen Erdorbit befinden sich in der Vorbereitung bzw. wurden bereits gestartet: EnMAP, TanDEM-X und TET-1. Darüber hinaus existieren konkrete Pläne für den Betrieb des DLR-Kompaktsatelliten "Asteroidfinder", für Nachfolgemissionen der TerraSAR-X-Linie, sowie für Missionen der kommerziellen bzw. hoheitlichen Erdbeobachtung (z.B. Ausbird oder HiROS).

Jeder dieser Satelliten wird ohne Relais-Satellit im nominalen Fall mit täglich zwischen zwei und vier Passagen von jeweils 10 Minuten Dauer über der DLR-Bodenstation Weilheim mit den notwendigen TT&C Daten versorgt. Gleichzeitig erfolgt die Überwachung und Auswertung der Telemetrie. Im Falle von schweren Anomalien oder "kontaktintensiven" Aktivitäten (z.B. Software-Uploads oder aufwändigen Bahnmanövern) wird je nach Bedarf zusätzlich Kontaktzeit über externe Bodenstationen zugekauft. Die Kosten für einen nominalen Kontakt betragen einige hundert Euro, die Verfügbarkeit externer Stationen kann bis zu einigen hunderttausend Euro kosten. Die Uplink-Datenraten liegen im kbit/s Bereich.

Neben einer Verringerung der notwendigen Bodenstations-Kontaktzeiten bedeuten verlängerte Kontaktzeiten über einen Relais-Satelliten (ca. 45 Minuten statt 10 Minuten eine drastisch erhöhte Flexibilität für den Betrieb. So können Doppelkontakte (und damit entsprechende doppelte Betriebsschichten) weitgehend vermieden werden. Darüber hinaus bedeuten zusätzliche Zugriffsmöglichkeiten auf die Satelliten (ca. 15 mal/Tag für 45 Minuten) eine starke Erhöhung der operationellen Sicherheit vor allem in schwierigen Missionsphasen.

Die Verfügbarkeit eines TT&C Daten-Relais für Satellitenmissionen wäre auch zur Unterstützung von Missionen anderer Raumfahrtteinrichtungen attraktiv (ESOC, EUMETSAT, CNES, etc.), da bezüglich Flexibilität und Kontaktdauer auch deren Bodenstationsnetzwerke sinnvoll ergänzt werden könnten.

1.2.2 Nutzlastdaten Relais für Satelliten-Missionen im niedrigen Erdborbit

Eine der Aufgaben des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) besteht in Konzeption, Entwicklung und Betrieb von Multimissions-Bodeninfrastrukturen zum Betrieb der nationalen, europäischen und internationalen Erdbeobachtungsmissionen. Das DFD konzentriert sich dabei auf den Bereich der Nutzlastdaten, d.h. Empfang der Nutzlastdaten, deren Verarbeitung, Archivierung und Distribution. Für den Datenempfang betreibt das DFD neben der nationalen Bodenstation in Neustrelitz ein internationales Stationsnetzwerk mit u.a. mehreren polaren Stationsstandorten. Die Gesamtheit der Empfangskapazität des DFD kommt so z.B. zum Einsatz für die beiden Missionen TerraSAR-X und TanDEM-X. Stationen von Partnerorganisationen müssen sogar noch hinzugefügt werden.

Die Nachteile eines Stationsnetzwerkes sind jedoch

- hohe Betriebskosten polarer Stationen,
- Kosten für die Datenrückführung und
- Grenzen der Empfangskapazität bei Datenvolumina größer als 0,8 - 1 TByte pro Tag.

Dennoch sind Ausbau, Erhalt und Betrieb eines solchen Stationsnetzwerkes mindestens noch für ca. 10 bis 15 Jahre erforderlich und zunächst die einzige verfügbare Lösung, um hohe Datenvolumina empfangen zu können. Künftige Erdbeobachtungsmissionen werden die bei TerraSAR-X und TanDEM-X erzielten Datenvolumina noch übertreffen. Der Datenempfang mit der bisherigen Technologie im X-Band erweist sich mehr und mehr als Flaschenhals und Kostentreiber im Bodensegment. Es ist daher sinnvoll, die Erprobung und den Testbetrieb bis hin zur betrieblichen Nutzung von Relaisatelliten voranzutreiben.

1.2.3 Notwendigkeit mehrerer Datenverbindungen zu verschiedenen LEO Satelliten

Sowohl bei den niederratigen TT&C Verbindungen als auch bei den hochratigen Datenverbindungen wird es aus folgenden Gründen zunehmend erforderlich, gleichzeitig Datenverbindungen zu mehreren LEO Satelliten zu unterhalten:

- National und international sind eine Vielzahl kleiner LEO Satelliten für unterschiedliche Aufgaben geplant.
- Es sind zur Zeit sowohl zivile als auch militärische LEO Satelliten für die Erdbeobachtung in Planung.
- GEO Datenrelais sind auch erforderlich für LEO Satelliten, die zum Abhören von Antikollisionsnachrichten im Bereich der Luftfahrt oder Schifffahrt verwendet werden. Dadurch kann auch in entlegenen Gebieten die Überwachung des Flugverkehrs bzw. des Schiffsverkehrs verbessert werden. Bei Flugzeugen geschieht dies durch das Abhören von Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) Signalen über Satellit oder im Bereich der Schifffahrt

durch das Abhören von Automatic Identification System (AIS) Signalen. Für solche Systeme sind in der Regel Konstellationen aus mehreren LEO Satelliten erforderlich, und die Weiterleitung der empfangenen Nachrichten sollte rasch (ohne Zwischenspeicherung) über GEO Datenrelais erfolgen.

Die GEO Datenrelais können darüber hinaus nicht nur für LEO Satelliten, sondern auch für Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) oder Aerostaten eingesetzt werden.

1.3 Planung und Ablauf

Das Zeitablauf-Diagramm (Gantt-Diagramm) des Projekts ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Ursprünglich war eine Projektlaufzeit von 36 Monaten geplant, die allerdings bedingt durch Verzögerungen bei der Fertigung des Antennendemonstrators und der Modemsoftware kostenneutral um zwei Monate verlängert werden musste. Die Abschlussdemonstration des Gesamtsystems fand am 25.10.2012 am DLR-Standort Oberpfaffenhofen statt.

Folgende Meilensteine wurden für das Projekt festgelegt:

MS 1 Systemarchitektur erstellt; Linkbudgetanalysen und Parameteroptimierung abgeschlossen.

MS 2 Design Review – Zugriffs- und Übertragungsverfahren.

MS 3 Design Review – Multibeam-Antennensystem.

MS 4 Demonstrationssystem für die Multibeam-Antenne realisiert.

MS 5 Demonstrationssystem für die neuen Zugriffs- und Übertragungsverfahren realisiert.

MS 6 Zugriffs- und Übertragungsverfahren demonstriert und validiert.

MS 7 Multibeam-Antennensystem demonstriert und validiert.

MS 8 Projektabschluss.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Vom Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) wurden schon vor längerer Zeit Standards entwickelt, die für die Weltraumkommunikation und folglich auch für GEO Datenrelais eingesetzt werden können. Diese CCSDS Protokolle können für niederratige TT&C Datenverbindungen, als auch für die hochratige Datenübertragung verwendet werden. Eine Unterstützung mehrerer Satelliten (z.B. im Zeitmultiplex) ist bei diesen CCSDS Übertragungsverfahren jedoch nicht möglich. Die CCSDS Übertragungsverfahren passen sich auch nicht dem Übertragungskanal an, verschenken dadurch Übertragungskapazität, und sind deshalb auch anfällig gegenüber unerwarteten Signalverschlechterungen.

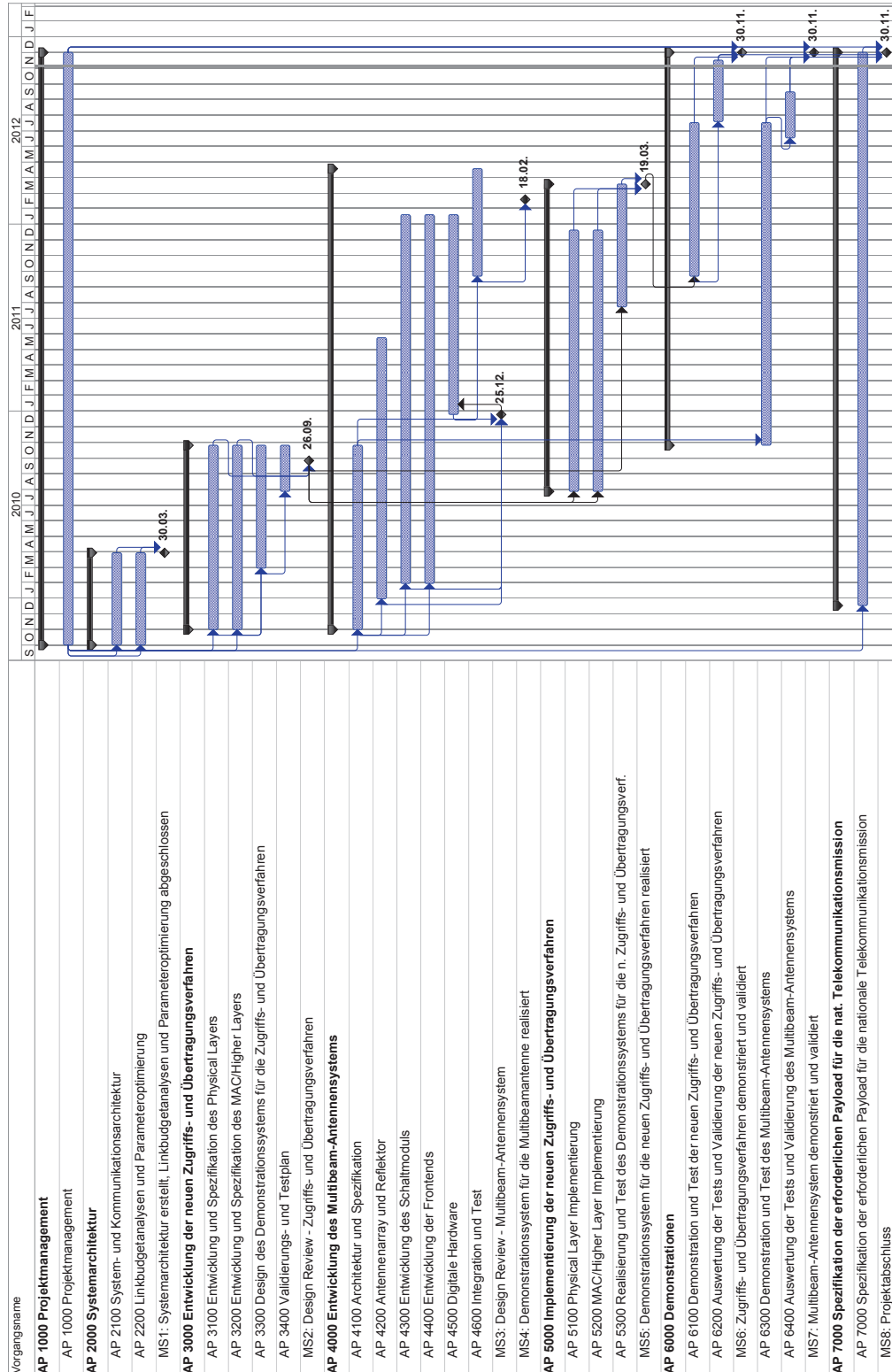


Abbildung 1.3: Zeitablauf-Diagramm des Projekts.

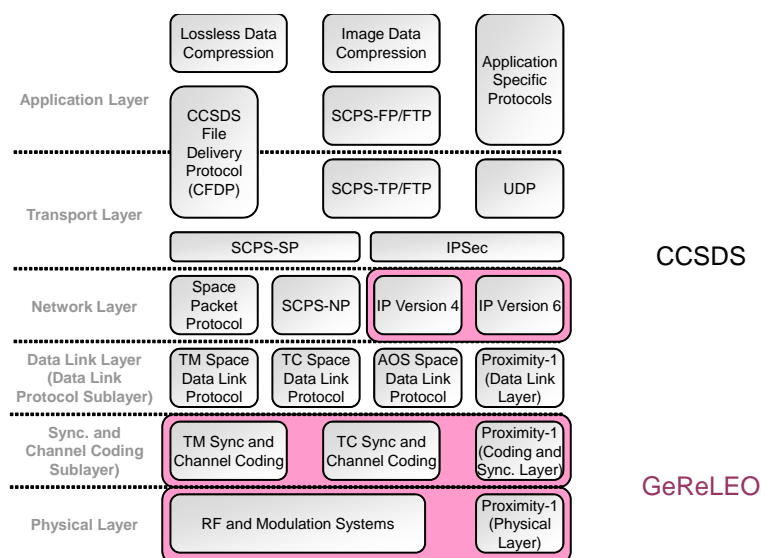


Abbildung 1.4: CCSDS Protokoll Architektur und GeReLEO Neuentwicklungen.

Es wurden bei CCSDS bisher keine Zugriffsverfahren (Multiplexverfahren) zur Unterstützung mehrerer LEO Satelliten standardisiert. Mit der in diesem Vorhaben durchgeführten Entwicklung dieser Zugriffsverfahren können niederratige Datenrelais kosteneffizient realisiert werden.

Abbildung 1.4 zeigt exemplarisch die CCSDS Protokollarchitektur. Im GeReLEO Projekt wurde die physikalische Schicht durch wesentlich effizientere und adaptierbare Verfahren ausgetauscht. So wurden beispielsweise spezielle Low-Density-Parity-Check (LDPC) Codes für GeReLEO entworfen und die Synchronisierungsverfahren mit Hinblick auf eine schnelle Resynchronisierung optimiert. Wie bereits erwähnt wurde zusätzlich ein Zeitmultiplexverfahren integriert. Zu den höheren CCSDS Protokollschichten besteht prinzipiell volle Kompatibilität; im Projekt wurde die Unterstützung von IPv4 und IPv6 demonstriert.

Bei den hier betrachteten Datenrelais im Ka-Band können kanaladaptive Übertragungsverfahren wegen der zeitvarianten Empfangssignalstärken (aufgrund von Entfernungsänderungen, des Durchfliegens der Beamkontur im globalen GEO Beam, einer Fehlausrichtung der Antenne oder wegen hoher Regendämpfungen) große Vorteile erzielen, da der Datendurchsatz durch die Anpassung des Übertragungsverfahrens an den Funkkanal maximiert wird und auch bei schlechten Übertragungsbedingungen noch Daten übertragen werden können.

Die vorgeschlagene neuartige Multibeam-Empfangsantenne ist speziell auf den Anwendungsbeereich der GEO Datenrelais für niedrigfliegende Satelliten zugeschnitten. Eine vergleichbare Antenne wurde dafür bisher noch nicht entwickelt.

Zur Zeit wird am European Space Agency (ESA) Programm European Data Relay Satellite System (EDRS) gearbeitet. Ein Schwerpunkt dieses Programms liegt bei den optischen Kommunikationsverbindungen, es wird jedoch auch das Ka-Band betrachtet. Die in diesem Verbundvorhaben vorgeschlagenen neuen Übertragungsverfahren und die vorgeschlagene neuartige Multibeam-Em-

pfangsantenne werden für das EDRS zur Zeit noch nicht diskutiert, könnten aber auch im Rahmen des künftigen EDRS sinnvoll eingesetzt werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

1.5.1 Verbundpartner

Das Projektkonsortium bestand aus folgenden Partnern:

DLR-Institut für Kommunikation und Navigation (DLR-KN)

Am Institut für Kommunikation und Navigation werden neue Systeme und Verfahren für die Funkübertragung und Funkortung entwickelt und untersucht. Angewandt werden sie bei der flächendeckenden Versorgung mit Multimediaminhalten, ebenso wie bei der Internetanbindung von Satelliten, Flugzeugen oder entlegenen Gebieten. Für den Bereich der Hochratenübertragung zwischen Satelliten und zum Boden wird an optischen Übertragungsverfahren gearbeitet. Die am Projekt beteiligten Fachabteilungen von DLR-KN sind die Abteilung Satellitennetze und die Abteilung Navigation. Die Abteilung Satellitennetze hat eine langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der satellitenbasierten Kommunikationssysteme, der Übertragungsprotokolle und der Kanalcodierverfahren. Die Antennengruppe der Abteilung Navigation hat langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der elektronisch phasengesteuerten Antennen und der digitalen Strahlformung. Für das Projektmanagement war die Abteilung "Institutsprojektmanagement und Institutsadministration" beteiligt.

Lehrstuhl für Kommunikation und Navigation der TU München (TUM-NAV)

Der Lehrstuhl für Kommunikation und Navigation der TU München wurde im Dezember 2004 gegründet. Der Lehrstuhl bietet heute drei Vorlesungen auf dem Gebiet der Navigation, sowie ein Praktikum an. Der Fokus der Arbeiten liegt zurzeit in der Satellitennavigation für sicherheitskritische Anwendungen, überwiegend in der Entwicklung und Untersuchung neuer Algorithmen. Angestrebt wird die Bearbeitung praxisrelevanter Themen, die technisch anspruchsvoll sind und dennoch in einem überschaubaren Zeitrahmen einer Lösung zugänglich zu sein scheinen. Als zweiter Schwerpunkt wurden, unter den obigen Prämissen, Arbeiten im Bereich der Satellitenkommunikation aufgegriffen. Das GeReLEO Projekt spielte dabei eine wichtige Rolle.

Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt (IZR))

Als eines von weltweit 500 Unternehmen aus dem Steinbeis Verbund bietet das Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt praxisorientierte Problemlösungen für die konkrete wirtschaftliche Nutzung. Bei den Projekten geht es um den Transfer von Erkenntnissen aus der Raumfahrttechnik für

klein- und mittelständische Unternehmen und um Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu dieser Thematik. Zu den weiteren Dienstleistungen gehören die technische Beratung, die Erstellung von Gutachten und Studien sowie Ingenieursdienstleistungen wie z.B. Apparateauslegung. Der Schwerpunkt des IZR liegt im Bereich Hardwareentwicklung für Raumfahrtanwendungen und der Programmierung von FPGAs. Das IZR war an mehreren erfolgreich verlaufenen Flugexperimenten beteiligt (z.B. GTS – Global Transmission Services) und hat deshalb Erfahrung in der Entwicklung flugtauglicher Hardware.

Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme (FhG ENAS)

Das Fraunhofer ENAS erarbeitet Forschungsleistungen vorrangig auf den Gebieten der Mikro- und Nanotechnologien für die Smart Systems Integration. Schwerpunkte der Forschungsarbeit sind die Entwicklung von MEMS/NEMS, das Back-end of Line für die Mikro- und Nanoelektronik, 3D-Integration, sowie die Bestimmung der Zuverlässigkeit von Komponenten und Systemen der Mikro- und Nanotechnologie. Dies umfasst ebenfalls Erfahrungen im Bereich Charakterisierung und Test von MST-Bauelementen, der Entwicklung von RF-MEMS oder einzelner RF-Komponenten und deren messtechnische Charakterisierung. Das Fraunhofer ENAS verfügt über geeignete Messtechnik zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der im Verbundprojekt bearbeiteten Bauelemente und über Mitarbeiter mit langjähriger Erfahrung auf diesem Gebiet. Für Simulation, Design und experimentelle Charakterisierung des elektrischen und des mechanischen Verhaltens werden speziell angepasste und kommerziell verfügbare Software und qualifizierte Messtechnik eingesetzt. Seit 2003 beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe mit Microelectromechanical Systems (MEMS) für Hochfrequenzanwendungen. Ergebnisse dieser Aktivität sind unter anderem Mikrosolen mit hoher Güte für Ultra-High Frequency (UHF) Anwendungen und elektrisch gesteuerte MEMS Kondensatoren für hohe Signalleistungen sowie verschiedene Konzeptstudien und proprietäre Auftragsentwicklungen.

EADS Innovation Works, Abteilung IW-SI: Sensors, Electronics and Systems Integration (EADS IW)

EADS ist einer der Weltmarktführer im Bereich Aeronautik, Verteidigung und Weltraum. Im Jahr 2005 erwirtschaftet EADS Einnahmen von 34,2 Mrd. € und beschäftigte 113.000 Mitarbeiter. EADS Innovation Works als zentrale Konzernforschung verfügt über Standorte in Deutschland, Frankreich, Spanien, Singapur und Russland. Diese Einrichtungen verfügen über erstklassige Möglichkeiten und Ausrüstung im Bereich Aeronautik, Verteidigung und Weltraumtechnik, um Produkte der Geschäftsbereiche durch technologische Innovationen weiter zu entwickeln. EADS IW verfügt über ein weites internationales Netzwerk mit Kontakten zu industriellen Partnern sowie renommierten universitären sowie institutionellen Forschungseinrichtungen. Die Einrichtung in Ottobrunn (bei München) beschäftigt sich seit Jahren mit MEMS für Hochfrequenzapplikationen und war bzw.

ist Partner mehrerer nationaler sowie europäischer Forschungsprojekte. Im Rahmen dieses Projekts brachte EADS IW vor allem seine Kompetenzen bezüglich des Designs von kapazitiven MEMS Schaltern, deren Herstellung und Charakterisierung ein.

SINTEC Microwave Systems GmbH (SINTEC)

Die SINTEC Microwave Systems GmbH mit Firmensitz in Böblingen gehört zu den schlankeren Unternehmen. Die 5 Mitarbeiter der SINTEC haben ihren Schwerpunkt auf die Entwicklung und Fertigung von Radarsystemen und Sende- und Empfangstechnik für Satellitenkommunikation und -navigation gelegt. Die Radarsysteme werden einerseits eingesetzt zur Bodenerkundung. Andere Systeme im K-Band sind als Winkel- und Geschwindigkeitsmesser aufgebaut. Im Rahmen mehrerer ESA-Projekte wurde eine Vielzahl von Modulen und Baugruppen als Flughardware für verschiedene Satelliten entwickelt. Die SINTEC Microwave Systems GmbH hat sich spezialisiert auf die flexible Realisierung von individuellen Lösungen für kleine Stückzahlen, wie sie in der Satelliten- und Verteidigungstechnik häufig anzutreffen sind. Für die Bestückung der Baugruppen steht eine ISO9001:2000-zertifizierte SMD-Fertigungslinie zur Verfügung. Hier werden kleinere Losgrößen inhouse gefertigt und getestet.

1.5.2 Unterauftragnehmer und Anwender

Astrium GmbH - Geschäftseinheit Satelliten

Für die Geschäftseinheit Satelliten der Firma Astrium als führendem europäischen Hersteller von Satelliten und Raumsonden für Kommunikation, Navigation, Erdbeobachtung und Wissenschaft sind Antennen ein strategisches Element, und die Beherrschung und Weiterentwicklung dieser Technologie ist ein wesentliches Merkmal in der Differenzierung gegenüber Mitwettbewerbern. Insbesondere im Geschäftsbereich "Telecommunications Satellites" werden im Antennen und Antennentestzentrum der Astrium GmbH in Ottobrunn die während der letzten drei Jahrzehnte aufgebauten Kompetenzen im Bereich Kommunikationsantennen und Antennenmesstechnik für die Weiterentwicklung dieser Technologien genutzt, um somit auch künftig eine führende Position in diesem Bereich sicherzustellen. Astrium war im Projekt für Beratungsleistungen als Unterauftragnehmer von DLR-KN tätig.

Kapitel 2

Eingehende Darstellung

2.1 Ausführlicher Ergebnisbericht

2.1.1 Mehrfachzugriff und kanaladaptive Übertragungsverfahren

Damit mehrere Teilnehmer miteinander kommunizieren können und sich nicht gegenseitig stören, dürfen sie nicht gleichzeitig auf derselben Frequenz senden, sondern müssen ihre Nachrichten nacheinander oder über verschiedene Frequenzen übermitteln. Abbildung 2.1 zeigt neben der Systemarchitektur auch die verwendeten Mehrfachzugriffsverfahren der verschiedenen Links. Der hochratige Link und der niederratige Telemetrielink verwenden jeweils Multi-Frequency Time Division Multiple Access (MF-TDMA), der niederratige Telecommandlink benützt Time-Division Multiplexing (TDM). Beim Zeitmultiplex, den beide Verfahren verwenden, wird zu verschiedenen Zeitpunkten gesendet, wobei die Zeit in Rahmen und jeder Rahmen in sich nicht überlappende Zeitschlitze aufgeteilt wird. MF-TDMA verwendet zusätzlich verschiedene Frequenzspektren. Der im GeReLEO verwendete Zeitmultiplex verwendet Zeitschlitze variabler Länge und verzichtet auf eine Rahmenstruktur. Die Länge der Zeitschlitze ist durch die Sichtbarkeit der LEO Satelliten begrenzt und wird vom Ressourcenallokationsalgorithmus im Network Control Center (NCC) festgelegt, wobei auch Nutzungs- und Vertragsbedingungen der verschiedenen Satellitenkunden beachtet werden. Zusätzlich wird zwischen zwei aufeinander folgenden Zeitschlitzen eine Schutzzeit eingefügt, um das Risiko einer gegenseitigen Beeinflussung zweier Modems zu minimieren.

Der Frequenzplan, welches Modem wann mit welcher Frequenz senden darf, wird auch im Voraus vom NCC berechnet, wobei eine manuelle Interaktion möglich ist. Diese Information wird zusammen mit den Zeitplänen als Inhalt der Resource Allocation Table (RAT) an die GeReLEO Modems übermittelt.

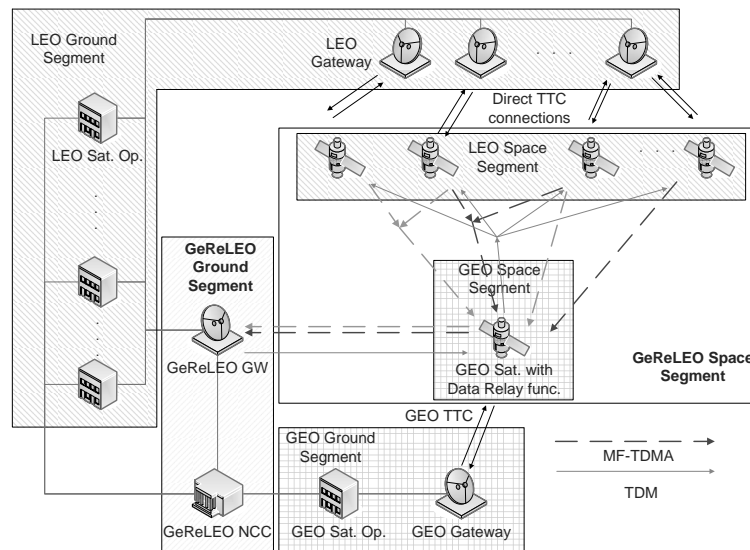


Abbildung 2.1: Systemarchitektur und die verwendeten Mehrfachzugriffsverfahren.

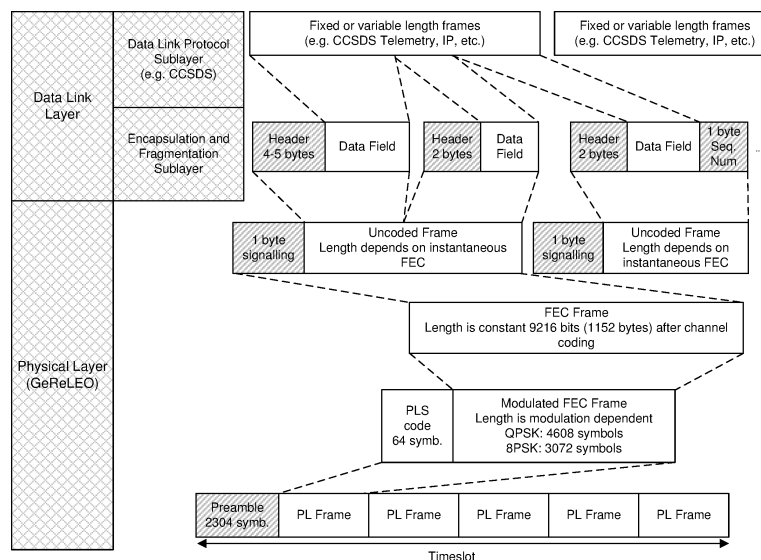


Abbildung 2.2: Protokollstapel für den hochratigen Link [Kat12a].

Protokollstapel und Wellenform

Abbildung 2.2 zeigt den verwendeten Protokollstapel für den hochratigen Link, welcher im Folgenden noch genauer beschrieben wird. Der für den niederratigen Link ist diesem sehr ähnlich. Den Input für das GeReLEO Modem bilden Datenpakete aus der Data Link Unterebene. Das können beispielsweise CCSDS Pakete mit Telemetriedaten, Advanced Orbiting Systems (AOS) Pakete [CCS07] oder direkt Internet Protocol (IP) Pakete sein.

Diese Pakete der höheren Ebenen werden von der Enkapsulierungs- und Fragmentierungsebene zu uncodierten Paketen verarbeitet, wobei die Länge dieser Pakete von verschiedenen Faktoren

abhängt. Zum einen spielt die Coderate des aktuell verwendeten ModCod Schemas eine wichtige Rolle, als auch die Länge des mit Forward Error Correction (FEC) codierten Pakets. Die angewandte Vorwärtsfehlerkorrektur basiert auf LDPC Codierung. Die Enkapsulierungs- und Fragmentierungsebenen sind sehr ähnlich zu denen des Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite – Second Generation (DVB-RCS2) Standards [ETS11].

Die Länge eines LDPC codierten FEC Paketes der hochratigen Verbindung besitzt eine konstante Länge von 9216 Bit, im Fall der niederratigen Verbindung 2304 Bit. Diese Längen wurden mit Blick auf die Limitierungen der FPGA Boards und Grenzen der adaptiven Codierung und Modulation gewählt. Die FEC Pakete werden entweder mit Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK) oder 8-Phase-Shift Keying (8-PSK) moduliert, eine höhere Modulationsart soll aber in Zukunft auch möglich sein.

Das modulierte FEC Paket bildet die Nutzdaten eines Pakets der physikalischen Ebene (Physical Layer (PL)). Ein PL Paket beginnt, genau wie im Digital Video Broadcasting – Satellite – Second Generation (DVB-S2) Standard [ETS05], mit einem 64 Symbole langem Physical Layer Signalling (PLS) Code, der 7 Bit an Information überträgt, beispielsweise die verwendete ModCod Nummer.

Ein Zeitschlitz beginnt mit einer 2304 Symbole langen Präambel, die Informationen zur Synchronisierung enthält. Danach folgen nacheinander die PL Pakete. Es ist geplant, zwischen den PL Paketen weitere Synchronisationsworte zu senden, um im Fall eines Synchronisationsverlusts die Neusynchronisierung zu unterstützen.

Trotz der Ähnlichkeiten zum DVB-S2 und DVB-RCS2 Standard wurde für das GeReLEO Projekt ein neues System entwickelt. Dies geschah vor allem wegen der durch die FPGA Boards bedingten Speicherbeschränkungen. So wären die Pakete in beiden Digital Video Broadcasting (DVB) Standards zu groß gewesen, und hätten nicht in einem FPGA implementiert werden können. Weiterhin wurde der DVB Standard für eine viel größere Anzahl an Teilnehmern entwickelt, was einen zu großen Signalisierungsaufwand bedeutet hätte.

Modulation und Codierung

Das GeReLEO System unterstützt verschiedene Kombinationen von Modulation und Codierung, um sich möglichst optimal an den vorhandenen Übertragungskanal anzupassen. Dabei soll jeder Link mindestens 12 verschiedene ModCods unterstützen, die jeweils eine Kombination aus QPSK und 8-PSK als Modulation und LDPC als Codierung sind. Die implementierten Kombinationen sind in Tabelle 2.1 für den niederratigen Link und in Tabelle 2.2 für den hochratigen Link aufgelistet. Die Tabellen zeigen den ModCod Index, das Modulationsformat, die Coderate r , die Anzahl der codierten Bits n , die Anzahl der Informationsbits k , die spektrale Effizienz, sowie die Signal-to-Noise Ratio (SNR) Schwelle bei einer Codewort-Fehler-Rate von 10^{-6} , bei der zum nächsten ModCod umgeschaltet wird. Im System werden zwei Arten unterstützt, um die ModCods auszuwählen: Variable Coding and Modulation (VCM) und Adaptive Coding and Modulation (ACM).

- **VCM:** Wird verwendet, wenn die Verbindung zwischen GEO Satellit und Gateway ein signi-

fikant höheres SNR besitzt als die Verbindung zwischen GEO und LEO Satellit. Dann wird das gesamte SNR vor allem durch die zeitvariante Freiraumdämpfung und die zeitvariante Verstärkung zwischen LEO und GEO Satellit bestimmt. Diese Effekte können im Voraus bestimmt werden, wodurch kein Rückkanal vom Empfänger zum Sender zur Kanalmessung benötigt wird. Die Information, wann welche ModCod Kombination verwendet wird, wird durch die RAT bestimmt.

- *ACM*: Hier wird ein Rückkanal vom Empfänger zum Sender verwendet, um Informationen über die Kanalbedingungen auszutauschen. Der ModCod Index des zu verwendenden Schemas wird kontinuierlich anhand dieser Informationen bestimmt.

Der Vorteil vom VCM liegt darin, dass kein Mehraufwand durch die Signalisierung des Kanalzustands entsteht, und der Empfänger nicht ständig den Kanalzustand bestimmen muss. Andererseits wird eine Instanz benötigt, die regelmäßig den Zeitplan für die ModCods im Voraus generiert und an die sendenden Modems verteilt. Dies muss auch abhängig vom dafür vorhandenen Speicher in den Modems geschehen. Einen weiteren Vorteil bringt diese Methode, wenn der LEO Satellit nur den hochratigen Link über den GEO Satelliten unterstützt, zum Beispiel wegen Einschränkungen der maximalen Masse oder des Energieverbrauchs keine Möglichkeit besteht, parallel Feedback zu versenden.

Bei ACM muss kontinuierlich Feedback übertragen werden, was zusätzlichen Datenverkehr mit sich bringt. Allerdings wird hier keine weitere Instanz zur Berechnung der ModCod Tabellen benötigt. ACM zeigt seine Vorteile, wenn die Speiseverbindung zwischen GEO Satellit und Gateway ein vergleichbares oder kleineres SNR besitzt als die Verbindung zwischen LEO und GEO Satellit. In diesem Fall kann das gesamte SNR auch durch atmosphärische Effekte beeinflusst werden, welche durch ACM abgeschwächt werden können. Bei der Verwendung von ACM wird bei der Auswahl des ModCods eine Hysteresekurve angewandt, um oszillierendes Umschalten zwischen zwei benachbarten ModCods zu vermeiden.

Media Access Control und höhere Schichten

Die Media Access Control (MAC) Ebene des GeReLEO Systems entspricht der Encapsulierungs- und Fragmentierungsebene im Protokollstapel (Abbildung 2.2). Sie unterstützt mehrere Warteschlangen pro LEO Satellit, die einzeln aktiviert oder deaktiviert werden können, sowie verschiedene Dienstgüten (Quality of Service (QoS)). Es ist möglich, die maximale Anzahl der Pakete pro Warteschlange sowie verschiedene Algorithmen zur Priorisierung und Steuerung der Paketflüsse festzulegen. Weiterhin werden MAC Adressen unterstützt, die eine Filterung des eingehenden Datenverkehrs nach Sender- und Empfängeradressen ermöglichen.

Die MAC Ebene ist auch für das Fragmentieren und Zusammensetzen der Pakete sowie für die Encapsulierung und Dekapsulierung des Paketstroms zuständig. Dazu wird das Return Link Encapsulation (RLE) Protokoll aus dem DVB-RCS2 Standard [ETS11] verwendet, das eine flexible Encapsulierung ohne

Tabelle 2.1: ModCods für den niederratigen Link.

index	Mod.	r	n	k	SE [bit/s/Hz]	$\frac{E_s}{N_0}$ @CER=10 ⁻⁶ [dB]
1	QPSK	0.25	2304	576	0.5	-1.11
2	QPSK	0.33	2304	768	0.66	0.1
3	8-PSK	0.25	2304	576	0.75	0.65
4	QPSK	0.42	2304	960	0.833	1.21
5	QPSK	0.5	2304	1152	1	2.25
6	8-PSK	0.42	2304	960	1.25	2.97
7	QPSK	0.67	2304	1536	1.33	4.25
8	8-PSK	0.56	2304	1280	1.667	4.72
9	8-PSK	0.61	2304	1408	1.833	5.28
10	8-PSK	0.67	2304	1536	2	6.01
11	8-PSK	0.72	2304	1664	2.167	6.66
12	8-PSK	0.78	2304	1792	2.33	7.23

Tabelle 2.2: ModCods für den hochratigen Link.

index	Mod.	r	n	k	SE [bit/s/Hz]	$\frac{E_s}{N_0}$ @CER=10 ⁻⁶ [dB]
1	QPSK	0.25	9216	2304	0.5	-1.86
2	QPSK	0.33	9216	3072	0.66	-0.55
3	8-PSK	0.25	9216	2304	0.75	-0.1
4	QPSK	0.42	9216	3840	0.833	0.61
5	QPSK	0.5	9216	4608	1	1.65
6	8-PSK	0.42	9216	3840	1.25	2.37
7	QPSK	0.67	9216	6144	1.33	3.5
8	8-PSK	0.56	9216	5120	1.667	4.02
9	8-PSK	0.61	9216	5632	1.833	4.63
10	8-PSK	0.67	9216	6144	2	5.26
11	8-PSK	0.72	9216	6656	2.167	6.01
12	8-PSK	0.78	9216	7168	2.33	6.78

viel Overhead bietet. Diese Protokollschicht ist momentan noch auf Personal Computern (PCs) implementiert, soll aber im Nachfolgeprojekt auf eine satellitentaugliche Plattform portiert werden.

Demonstration der Datenübertragung

Es wurde ein Demonstrator aufgebaut, der die Übertragung von Daten über das GeReLEO System zeigt. Ein schematischer Aufbau dieses Demonstrators ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Er besteht aus zwei Racks, die einmal den LEO Satelliten und einmal das Gateway repräsentieren. Jedes der Racks besteht aus einem PC und einem FPGA-Board. Auf dem PC befinden sich die Anwendungen für die Protokollebenen MAC und höher, sowie die Steuerung für die Modems. Die Modems sind in den FPGAs implementiert, die die physikalische Schicht darstellen. Die beiden Modems sind mit Koaxialkabeln verbunden und senden mit einer Frequenz von 70 MHz. Die Verbindung zwischen allen anderen Komponenten ist über Ethernet realisiert. Am PC des LEO Satelliten ist eine Webcam angeschlossen, die als Datenquelle für die zu übertragenden Nutzdaten fungiert. Der GEO Satellit, der sich zwischen den beiden Modems befinden würde, wird in diesem Demonstrator als ein transparentes System behandelt.

Der Gateway ist mit einem weiteren PC verbunden, der den LEO Satellitenoperator darstellt. Dieser dient zur Überwachung der Kommunikation zwischen den LEO und Gateway PCs sowie zur Steuerung der LEO Nutzlast, also der Webcam. Die Steuerung der Kamera und die Darstellung des Bildes erfolgt über das kameraeigene Webinterface, auf das mit einem Webbrowser vom Operator-PC aus zugegriffen wird. Die Überwachung der Kommunikation erfolgt über eine extra Graphical User Interface (GUI), die die Empfangsdatenrate von LEO Satellit und Gateway sowie den aktuell verwendeten ModCod Index darstellt. Webbrowser sowie GUI werden auf extra Bildschirmen angezeigt.

In Abbildung 2.5 ist der reale Aufbau des Demonstrators abgebildet. Zu sehen sind die Kamera links, gefolgt von den Racks für Satellit und Gateway. Im Hintergrund befinden sich die Monitore zum Anzeigen des Bildes und der Daten. Demonstriert wurde der niederratige Link in beiden Richtungen mit VCM und einem manuell erstellten Plan von ModCods. Eines der FPGA Boards mit der Implementierung der physikalischen Schicht ist in Abbildung 2.3 detaillierter zu sehen.

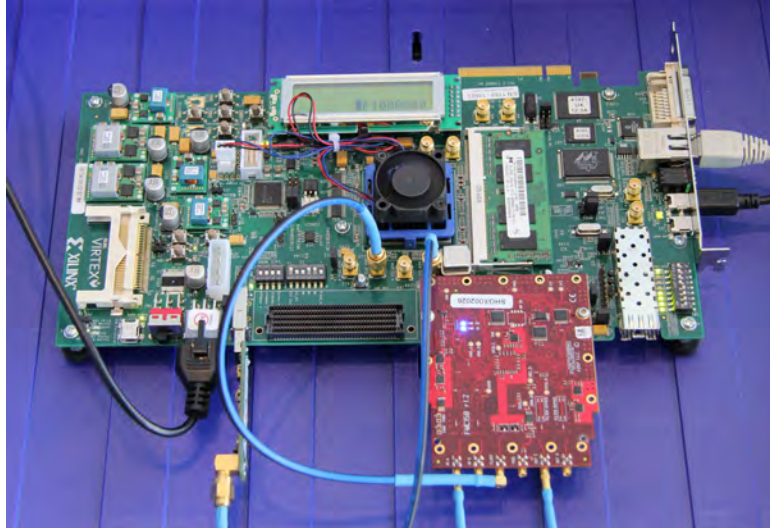


Abbildung 2.3: FPGA Board für die physikalische Schicht.

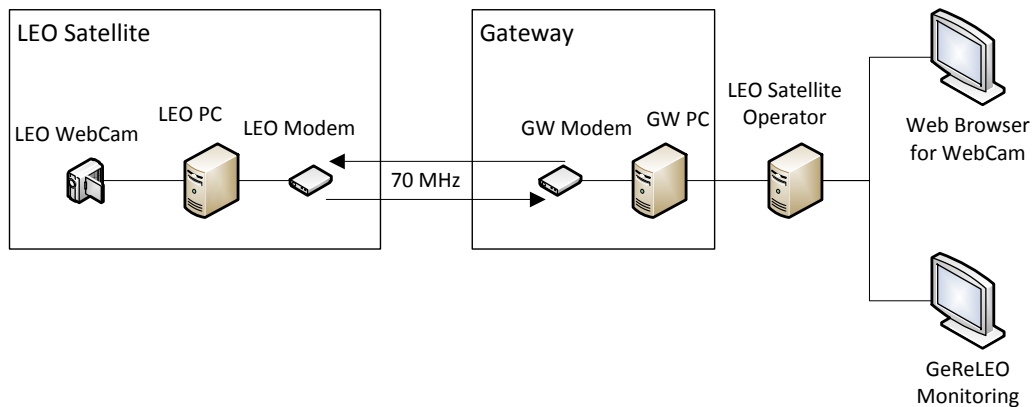


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Demoaufbaus.



Abbildung 2.5: Demonstration der Datenübertragung.

2.1.2 Multibeam-Antennensystem

Architektur

Für ein hochratiges GEO Datenrelais für niedrigfliegende (LEO) Satelliten werden elektronisch steuerbare Multibeam-Antennen mit hohem Gewinn (> 40 dB) benötigt. Um eine ausreichende räumliche Trennung zwischen den LEO Satelliten zu ermöglichen, muss die Beambreite der Multibeam-Empfangsantenne kleiner 1° sein. Prinzipiell gibt es zwei geeignete Antennenarchitekturen, die in absehbarer Zeit raumfahrttauglich gebaut werden können: Ein direktstrahlendes Array (Direct Radiating Array, DRA) und eine arraygespeiste Reflektorantenne. Zusammen mit dem Unterauftragnehmer Astrium GmbH wurden eine detaillierte Untersuchung und ein Vergleich der beiden Architekturen durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass sich arraygespeiste Reflektorantennen besser für die geplante Anwendung eignen, während direktstrahlende Arrays für etwas niedrigere Gewinnwerte und kleineren Steuerbereich durchaus attraktiv sein können. Abbildung 2.6 zeigt häufige Bauformen von arraygespeisten Reflektorantennen. Die zentrierte Anordnung mit einem Reflektor

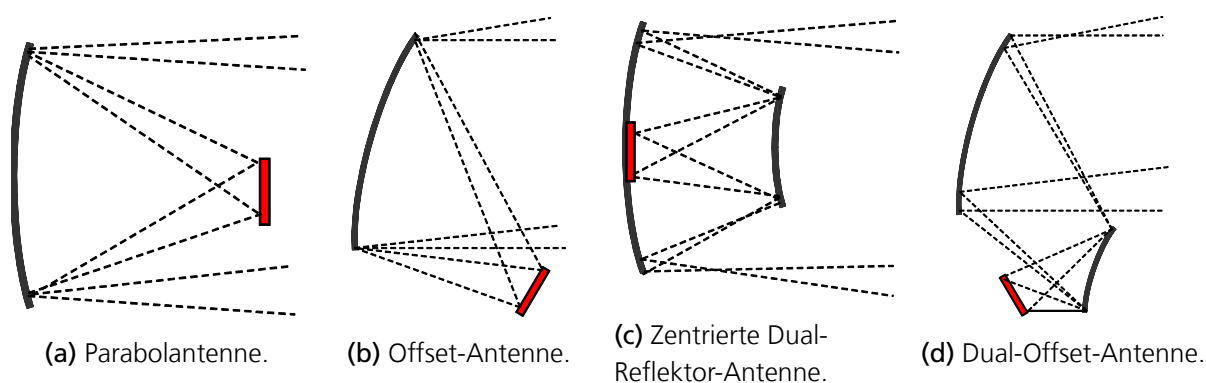


Abbildung 2.6: Reflektoranordnungen.

tor (Abbildung 2.6a) hat den Nachteil, dass das aktive Array nicht in dem Satelliteninneren untergebracht werden kann und somit großen Temperaturunterschieden im All (-160°C bis 120°C) ausgesetzt wäre. Die drei anderen Anordnungen erlauben eine partielle Unterbringung des Arrays im Satelliten und eignen sich prinzipiell für unsere Anwendung. Die zentrierten Dual-Reflektor Konfigurationen (Abbildung 2.6c) können auf dem Erddeck eines Satelliten montiert werden und verfügen im Vergleich zu Bauformen mit nur einem Reflektor über kurze Brennweiten. Das Array, das den Reflektor speist, schattet jedoch einen Teil des Reflektors ab, wodurch die effektive Reflektorfläche und somit auch der verfügbare Gewinn verringert wird. Dieses Problem wird mit Hilfe von Offset-Bauformen (Abbildung 2.6b, 2.6d) gelöst, da in den Offset-Konfigurationen nur ein seitlich liegender Teilabschnitt des Parabolspiegels realisiert wird und dadurch der Fokuspunkt des Reflektors sich außerhalb der Wellenfront befindet. Eigenschaften aller hier dargestellten Reflektorantennen-Bauformen wurden durch dreidimensionale elektromagnetische Simulationen genau untersucht. Dazu wurden kommerziell verfügbare Simulationstools *Ansoft Designer*

und *FEKO* eingesetzt. In den durchgeführten Simulationen wurden u.a. Einflüsse von Reflektordurchmesser, Offsetwinkel, Verhältnis von Brennweite f zum Durchmesser D (f/D) und Strahlungsdiagramme der Speiseelemente untersucht. Genauere Informationen über die Art und Konfiguration der Simulationen sowie ein Vergleich zwischen numerischen Ergebnissen von zwei Simulationstools wurden in Referenz [Gre+10b] veröffentlicht. Die Simulationen ergaben, dass nur die Offset-Bauweise mit einem Reflektor und die zentrierte Dual-Reflektor-Antenne die benötigte Performance liefern können. Bei der Dual-Offset-Konfiguration muss der Subreflektor relativ groß sein, um den gewünschten Schwenkbereich zu bekommen, was zu einem großen Offsetwinkel führt, der wiederum einen deutlichen Gewinnabfall für größere ($\sim 10^\circ$) Schwenkwinkel verursacht. Eine Variante der zentrierten Dual-Reflektor-Antenne (Ritchey-Chrétien) wurde im Rahmen dieses Projektes vom Lehrstuhl für Kommunikation und Navigation der Technischen Universität München detailliert untersucht. Von DLR-KN wurde die einfache Offset-Antenne als die vielversprechendste Variante ausgewählt und optimiert.

Eine arraygespeiste Reflektorantenne kann zwischen verfügbaren festen Beams umschalten und dadurch die Bewegung von Satelliten verfolgen. Dies ist in Abbildung 2.7 schematisch dargestellt. Die Subarrays, die in den Empfang der Daten involviert sind, werden mit Hilfe einer rekonfigurierbaren Schaltmatrix an die Satelliten-Transponder durchgeschaltet. Der Gewinn der Antenne kann

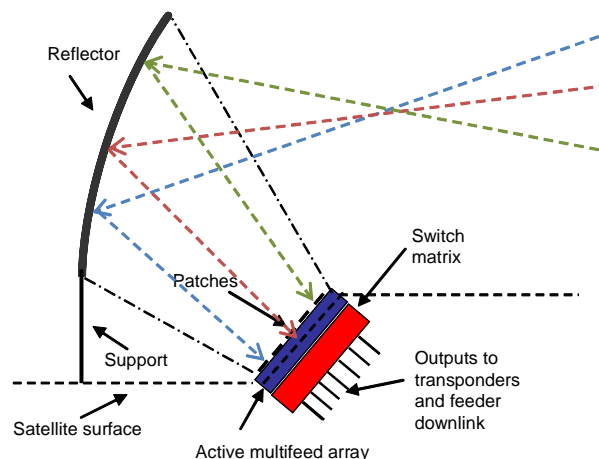


Abbildung 2.7: Arraygespeiste Offset Reflektorantenne.

aber deutlich variieren, wenn sich ein Satellit im Bereich zwischen den Spitzen von zwei benachbarten Beams bewegt. Diese Gewinneinbrüche hängen von der gewählten Architektur und der Anzahl der Antennenelemente ab und können 10 dB überschreiten. Um den Gewinnverlauf von arraygespeisten Reflektorantennen zu glätten und dadurch die erreichbare Datenrate zu maximieren, kann entweder die Anzahl der Antennenelemente erhöht werden oder die Beam-Umschaltung mit digitaler Strahlformung kombiniert werden. Beide Lösungen verursachen eine zusätzliche Schaltkomplexität, wobei die zweite Lösung auch eine unabhängige Schwenkung von jedem verfügbaren Beam und dadurch noch glatteren Gewinnverlauf ermöglicht. Abbildung 2.8 zeigt schematisch das Konzept mit der digitalen Strahlformung. In diesem Konzept werden aus N Arrayelementen

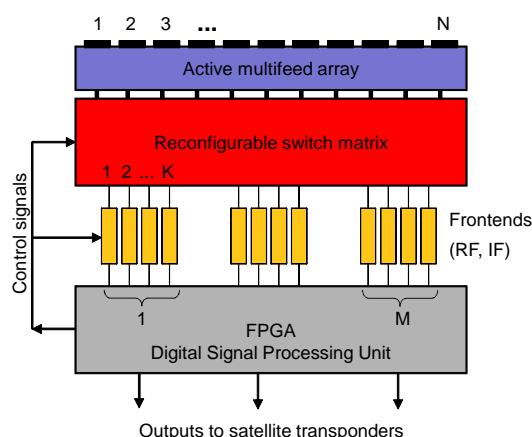


Abbildung 2.8: Konzept der Multibeam-Antenne mit digitaler Strahlformung.

des Multifeed-Arrays gleichzeitig Signale von M Beams durch die Schaltmatrix durchgeschaltet, wobei jeder Beam mit Hilfe von K Elementen empfangen wird. Die Strahlformungskoeffizienten werden unabhängig für jeden Beam berechnet und jeweils auf K Elemente angewendet. Dadurch können die festen Beams in engem Bereich geschwenkt werden. Um diese Schwenkung zu ermöglichen, muss das Phasenzentrum des K -Elemente-Subarrays verschoben werden. Dies kann mit unsymmetrischer Amplitudenbelegung im Array erreicht werden. Digitale Strahlformung bietet zusätzlich mehrere Vorteile, wie z.B. bessere Reflektorausleuchtung und dadurch einen höheren Gewinn, Störunterdrückung und Kompensierung von Ausrichtungsfehlern und Toleranzen. Einige Strahlformungseigenschaften von arraygespeisten Reflektorantennen wurden in [GD11] veröffentlicht.

Damit der gewünschte Schwenkbereich ohne große Gewinnunterschiede abgedeckt werden kann, werden mehrere hundert Arrayelemente oder Subarrays benötigt. Die Strahlelemente können prinzipiell in jeder raumfahrttauglichen Technologie gebaut werden. Um das Gewicht der Antenne zu reduzieren, wurde im Projekt der Einsatz einer Printed Circuit Board (PCB) Technologie auf der Basis von Polymer-Softsubstraten für das Multifeed-Array vorgeschlagen und deren Anwendbarkeit untersucht. Diese Technologie ermöglicht eine direkte Integration diskreter passiver und aktiver Bauelemente (z.B. Low Noise Amplifier, LNA) in den Schichtstapel des Multifeed-Array PCB. Somit werden die empfangenen Signale bereits nach einer sehr kurzen Laufzeit verstärkt, was die Rauschzahl des Systems verbessert. Die verstärkten Signale gelangen dann zur rekonfigurierbaren Schaltmatrix, die sich direkt hinter dem Multifeed-Array befindet. In der Schaltmatrix werden, abhängig von deren Verlusten, weitere Verstärkerstufen integriert. Die Ausgänge der Schaltmatrix sind direkt mit Radio Frequency (RF) Frontends verbunden, die in zwei Stufen die Signale verstärken, filtern und auf die Zwischenfrequenz heruntermischen. Im Konzept mit der digitalen Strahlformung gelangen die Signale dann zur digitalen Hardware, wo sie weiter verarbeitet werden.

Durch den Einsatz von passiven und aktiven Bauteilen, wegen unterschiedlicher Signalwege in der Schaltmatrix und großen Temperaturunterschieden im All ändern sich die Laufzeiten der Signale

und das System mit digitaler Strahlformung muss häufig kalibriert werden. Dazu eignen sich prinzipiell Verfahren, die auf interner oder externer Kalibrierung basieren (Abbildung 2.9).

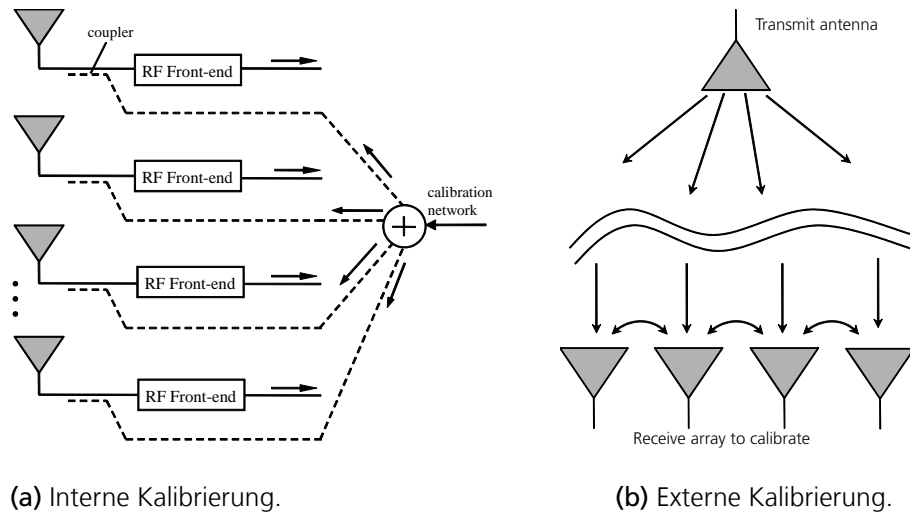


Abbildung 2.9: Kalibrierverfahren.

Die interne Kalibrierung benötigt ein internes Kalibriernetzwerk, das in die Multifeed-Array-Struktur integriert ist. Da das Array einige hundert Elemente hat, ist die Integration eines großen Kalibriernetzwerks problematisch. Bei der internen Kalibrierung wird auch der Einfluss des Reflektors nicht mitkalibriert. Bessere Eigenschaften und eine einfachere Ausführung bietet die externe Kalibrierung, bei der der ganze Signalpfad einschließlich Reflektor kalibriert wird. Eine mögliche Art der Kalibrierung, die auch für das Zielsystem einsetzbar ist, wird in Abschnitt 2.1.2 beschrieben.

Demonstrationskonzept

Die Eigenschaften des vorgeschlagenen neuartigen Konzepts der Multibeam-Antenne sollten mit einem Demonstrationsystem validiert werden. Der Demonstrator sollte in der Lage sein, sowohl das Funktionsprinzip zu demonstrieren, als auch quantitative Aussagen über die erreichbare Performance und durch den Einsatz der digitalen Strahlformung erzielten Verbesserungen zu liefern. Insbesondere sollte das Demonstrationsystem die Multibeam-Fähigkeit, den Einfluss der Beam-Umschaltung auf die Strahlungscharakteristik und den Einfluss der Kalibrierung demonstrieren.

Abbildung 2.10 zeigt schematisch das zu realisierende Demonstrationssystem. Der Reflektor in der Offset-Konfiguration mit einem Durchmesser von 60 cm wird mit Hilfe von 2x2 Subarrays eines 4x4 Multifeed-Arrays gespeist. Der Mittelpunkt des Arrays befindet sich im Brennpunkt des Reflektors, in einem Abstand von 90 cm von seinem Mittelpunkt. Das Multifeed-Array hat 16 Ausgänge, d.h. jeder Strahler hat einen separaten Ausgang und jeder Beam wird mit Hilfe von vier Elementen erzeugt. Dadurch lassen sich neun unterschiedliche Beamrichtungen für jeden Receiver erzeugen. Die Ausgänge des Arrays sind mit Hilfe von verlustarmen HF-Kabeln mit den Eingängen der MEMS

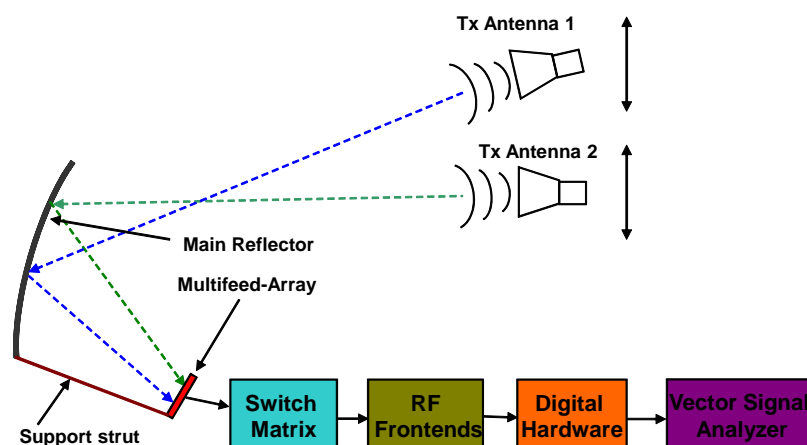


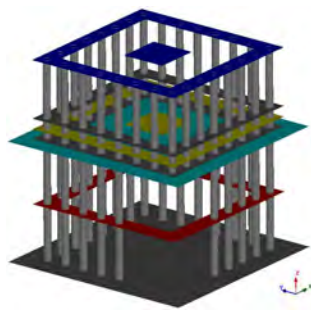
Abbildung 2.10: Demonstrationssystem.

Schaltmatrix verbunden. Die Schaltmatrix leitet gleichzeitig Signale von zwei Beams an ihre acht Ausgänge weiter. Die Signale werden dann durch verlustarme Kabel mit acht RF Frontends verbunden, wo sie verstärkt, gefiltert und auf eine Zwischenfrequenz von 70 MHz umgesetzt werden. Sie gelangen dann zur digitalen Hardware, wo sie Kalibrierung und digitaler Strahlformung unterzogen werden. An den Ausgängen der digitalen Hardware werden *I*- und *Q*-Komponenten für die beiden Beams ausgegeben. Sie können dann z.B. mit Hilfe von Spektrumanalysatoren bewertet werden.

Antennenarray und Reflektor

Mit dem steigenden f/D Verhältnis eines Reflektors muss sein Feed direkter sein, um ihn optimal auszuleuchten. Im Rahmen einer Diplomarbeit [Man11] wurde deswegen untersucht, inwieweit die Direktivität einer Patchantenne erhöht werden kann. Umfangreiche Simulationen haben ergeben, dass die höchste Direktivität durch eine Kombination von zwei übereinander liegenden Patches (Stacked-Patch Architektur) mit einem Via-Zaun erreicht werden kann. Abbildung 2.11 zeigt eine 3D-Zeichnung und Fotos der gefertigten hochdirektiven Antenne. Die Antenne ist komplex und relativ dick (ca. 11 mm). Eine Parameterstudie ergab, dass sie sehr empfindlich gegenüber Toleranzen ist. Deswegen wurde parallel eine einfachere Architektur mit nur einem Patch entworfen, optimiert und gebaut. Die Dicke dieser Antenne beträgt nur 1,9 mm. Beide Architekturen erzeugen jeweils zirkuläre Polarisierung durch Anregung von zwei orthogonalen Moden über ein 90°-Hybrid. Dadurch kann die kreuzpolare Komponente unterdrückt werden und eine größere Bandbreite erreicht werden. Durch die Einspeisung von zwei orthogonalen Moden sind die Antennen auch unempfindlicher gegenüber Verkopplungen im Array im Vergleich zu einfacheren Architekturen mit nur einer Speiseleitung.

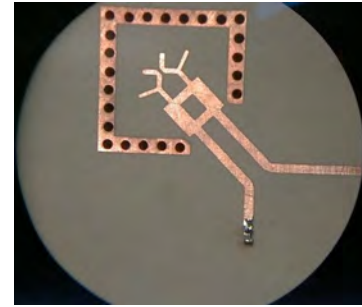
Beide Architekturen wurden gefertigt und in der Nahfeld-Messanlage von Fraunhofer IIS in Nürnberg (Abbildung 2.12a) vermessen.



(a) 3D-View.



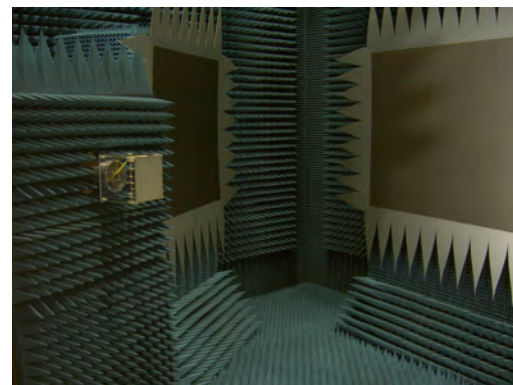
(b) Foto der Antenne.



(c) Foto einer Schicht mit 90°-Hybrid und 50 Ohm Widerstand.

Abbildung 2.11: Hochdirektive Patchantenne mit Stacked-Patch Architektur und einem Via-Zaun.

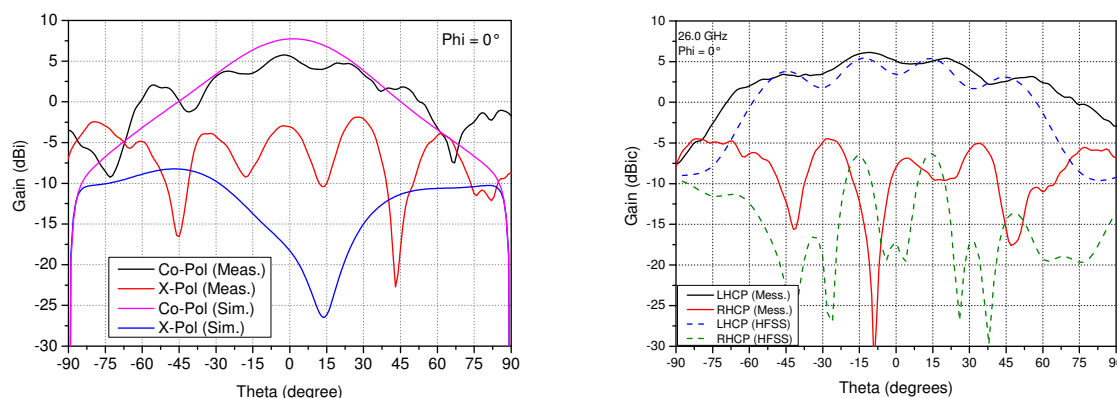

(a) Messung bei Fraunhofer IIS Erlangen.



(b) Messung an der Hochschule München.

Abbildung 2.12: Messungen der Patch-Antennen.

Abbildung 2.13 zeigt einen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Ergebnissen bei 26 GHz. Der simulierte hohe Gewinn für die hochdirektive Patchantenne (Prototyp 1) konnte nicht erreicht werden. Wegen des sehr komplizierten Aufbaus und der dadurch verursachten Ungenauigkeiten ist auch die kreuzpolare Komponente deutlich größer als erwartet. Die erreichte Bandbreite ist auch niedriger als in Simulationen vorhergesagt, bei anderen Frequenzen ist das Strahlungsdiagramm zum Teil verzogen und erreicht noch niedrigere Gewinnwerte. Bessere Eigenschaften bietet die zweite Architektur (Prototyp 2) mit nur einem Patch, die auch deutlich breitbandiger ist. Eine leichte Welligkeit im Strahlungsdiagramm ist auf die endliche Größe des Substrats zurückzuführen. Die zweite Architektur ist auch viel leichter, einfacher zu bauen und unempfindlicher gegenüber Toleranzen, was beim Einsatz im All wegen der erheblichen Temperaturunterschiede sehr vorteilhaft ist. Die benötigte höhere Direktivität des Reflektor-Feeds für steigende f/D Verhältnisse kann nicht nur über steigende Direktivität des Einzelstrahlers erreicht werden, sie ist auch durch Zusammenschalten von mehreren Patchelementen zu einem fest-verdrahteten Subarray möglich. Da mit dem zunehmendem f/D Verhältnis auch der Abstand zwischen den Subarrays steigt, ist der Platz für den Einsatz von größeren Subarrays stets ausreichend. Aus diesen Gründen wurde die zweite Architektur ausgewählt und für die weiteren Simulationen der Multibeam-Antenne verwendet.



(a) Vergleich Simulation-Messung für Prototyp 1. (b) Vergleich Simulation-Messung für Prototyp 2.

Abbildung 2.13: Vergleich zwischen Simulationen und Messungen für zwei Patchantennen-Architekturen.

Abbildung 2.14 zeigt Strahlungsdiagramme einer Beispielkonfiguration mit einem Reflektordurchmesser von 120 cm, einem Offset-Winkel von 25° und einem f/D Verhältnis von 1,5. Der Reflektor wird mit Hilfe von 4×4 Subarrays gespeist, die fest verdrahtet sind. Der Abstand zwischen den Patchelementen beträgt 8 mm. Um den gesamten Schwenkbereich der Antenne zu erreichen, werden 345 Beams, d.h. 345 Antennenausgänge benötigt. Details über die Simulationsverfahren wurden in [Gre+10a] veröffentlicht.

In den dargestellten Ergebnissen kann man erkennen, dass die Gewinnwerte zwischen zwei benachbarten Beams um bis zu 10 dB schwanken. Dadurch verringert sich die mittlere erreichbare Datenrate. Diese Gewinnminima können durch Erhöhung der Anzahl der verfügbaren Beams deutlich angehoben werden. Das kann durch Überlappung zwischen den Subarrays erzielt werden. Wenn in der dargestellten Beispielkonfiguration, statt fest verdrahteter 4×4 Subarrays nur 2×2 Subarrays fest miteinander verbunden sind, dann kann jedes 2×2 Subarray ein Teil von mehreren 4×4 Subarrays sein. Dadurch erhöhen sich nicht nur die Schwenkmöglichkeiten der Beams in jeder Richtung zweimal und die Anzahl der Antennenausgänge viermal. Abbildung 2.15 zeigt die Strahlungsdiagramme im Falle einer Überlappung von 2×2 Subarrays. Gewinnunterschiede zwischen zwei benachbarten Beams sind jetzt deutlich niedriger (< 3 dB).

Demonstrationssystem

Das 4×4 Multifeed-Array wurde aus 16 Patchantennen vom Prototyp 2 gebaut. Der Abstand zwischen den Patchelementen beträgt 10 mm. Abbildung 2.16 zeigt eine CAD Zeichnung des Arrays und ein Foto von dessen Rückseite mit Sub-Miniature-Push-On (SMP) Steckern. Es wurde auch ein Array gebaut, das durch am Rand der Struktur befestigte K-Stecker gespeist wurde. Beide Array-Konfigurationen wurden an der Hochschule München vermessen (Abbildung 2.12b). Abbildung 2.17

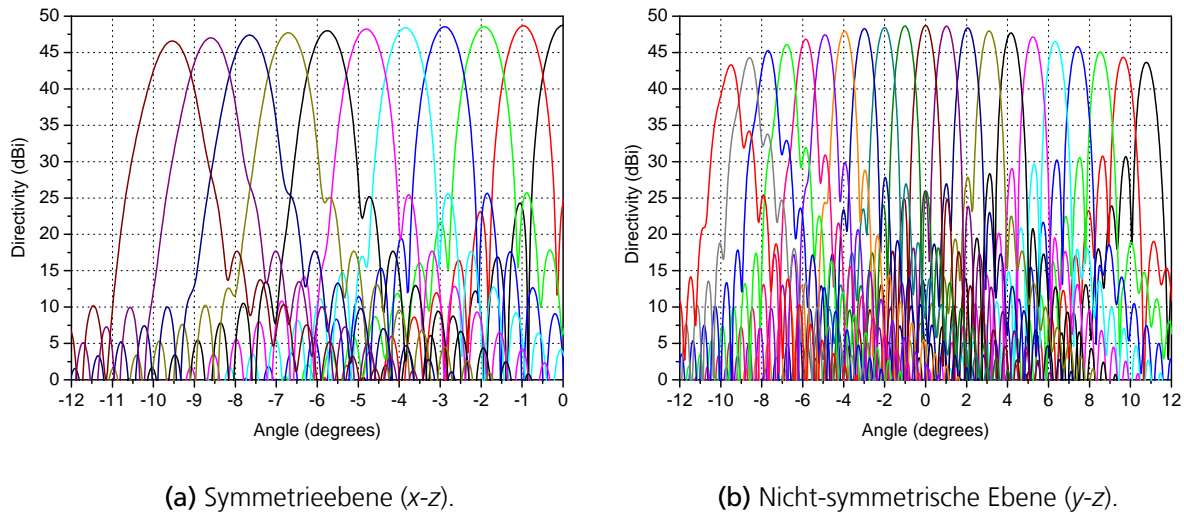


Abbildung 2.14: Strahlungsdiagramme einer Beispielkonfiguration mit $D=120$ cm, $f=180$ cm, Offset-Winkel von 25° . Speisung mit 4×4 Subarrays. Keine Überlappung zwischen Subarrays.

zeigt Messergebnisse bei 26 GHz von zwei Arrayelementen – in der Ecke und in der Mitte des Arrays. Leichte Welligkeit in den Strahlungsdiagrammen wurde durch Verkopplung im Array und den nicht ideal abschirmenden Via-Zaun hervorgerufen.

Bei der Fertigung der Arrays kommt Mikrostreifenleitungstechnologie zum Einsatz, d.h. die Antenne wird mit Verfahren aus der Platinenfertigung hergestellt. Dies senkt die Herstellungskosten, macht die Antenne kleiner und leichter. Die Nutzung dieser Technologie für Antennen bei Weltraumanwendungen ist allerdings relativ neu. Daher wurden beim DLR-Institut für Raumfahrtssysteme drei Raumfahrttauglichkeitstests nach European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Norm (Abbildung 2.18) mit einem Einzelstrahler (Prototyp 1) und einem 4×4 Array (Prototyp 2) durchgeführt. Alle drei Tests wurden bestanden.

Der Demo-Reflektor wurde in Offset-Konfiguration entworfen, gefertigt und vermessen. Der Durchmesser des Reflektors beträgt 60 cm, f/D ist 90 cm, der Offset-Winkel 25° . Abbildung 2.19 zeigt die Vermessung des Reflektors und seine Schwenkeigenschaften. Die Eigenschaften des im letzten Abschnitt beschriebenen Demonstrationssystems wurden detailliert untersucht. Eine Übersicht der durchgeführten Tests mit einigen Ergebnissen wurde in Referenz [Gre+12] veröffentlicht. In einer offiziellen Vorführung konnten alle wichtigen Eigenschaften des Systems erfolgreich gezeigt werden, u.a. die Multibeam-Fähigkeit sowie der Einfluss von Kalibrierung und digitalem Beamforming. Abbildung 2.20 zeigt das Demonstrationssystem am Tag der offiziellen Präsentation.

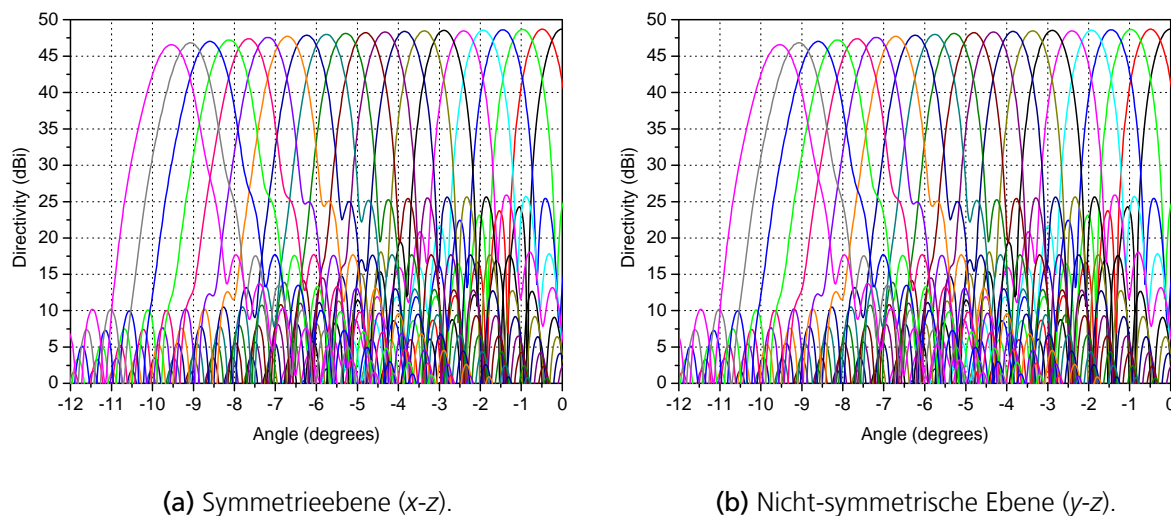
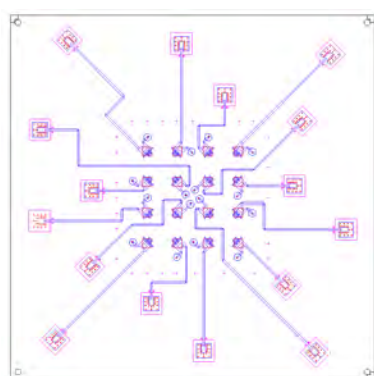


Abbildung 2.15: Strahlungsdiagramme einer Beispielkonfiguration mit $D=120$ cm, $f=180$ cm, Offset-Winkel von 25° . Speisung mit 4×4 Subarrays. Überlappung zwischen 2×2 Subarrays.

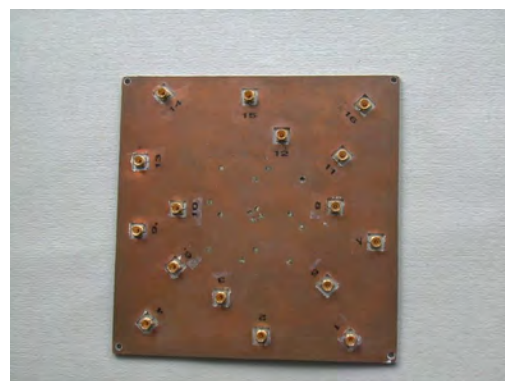
Schaltmodul und Frontend

Das Schaltmodul wurde vom Projektpartner EADS beigesteuert. Es realisiert ein 16 zu 8 Multiplexing der empfangenen Antennensignale, d.h. es werden acht der sechzehn Empfangssignale ausgewählt. Besondere technische Herausforderungen ergaben sich aus der hohen Signalfrequenzen um 26 GHz sowie der Anforderung nach einer möglichst geringen Leistungsaufnahme im Schaltzustand. Der genaue Aufbau sowie die Entwicklung der Hochfrequenz (HF) MEMS Schalter sind in den Veröffentlichungen und im Schlussbericht des Projektpartners zu finden [Fig+12b; Fig+12a; Men+11].

Die Frontends erfüllen die Aufgabe, die empfangenen Signale auf eine Zwischenfrequenz von

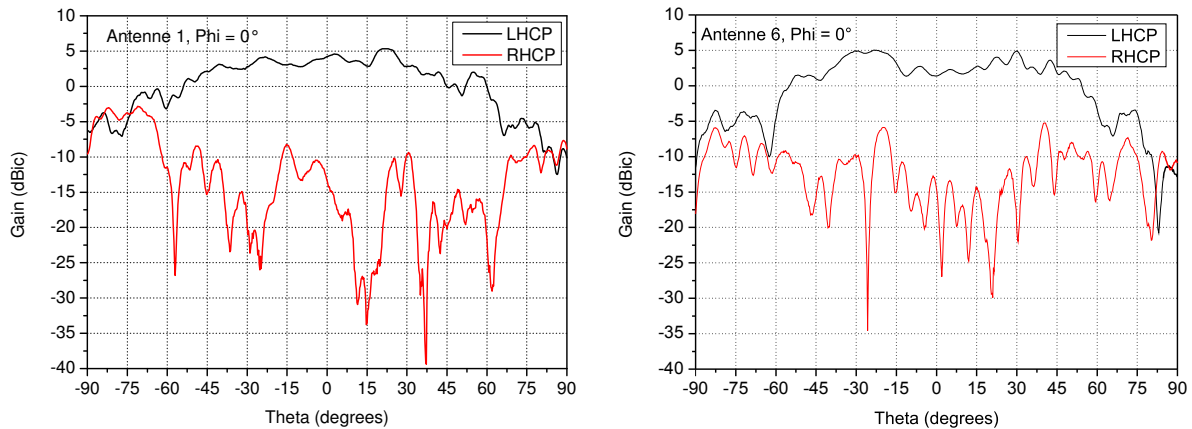


(a) Durchsicht des 4×4 Multifeed Arrays.



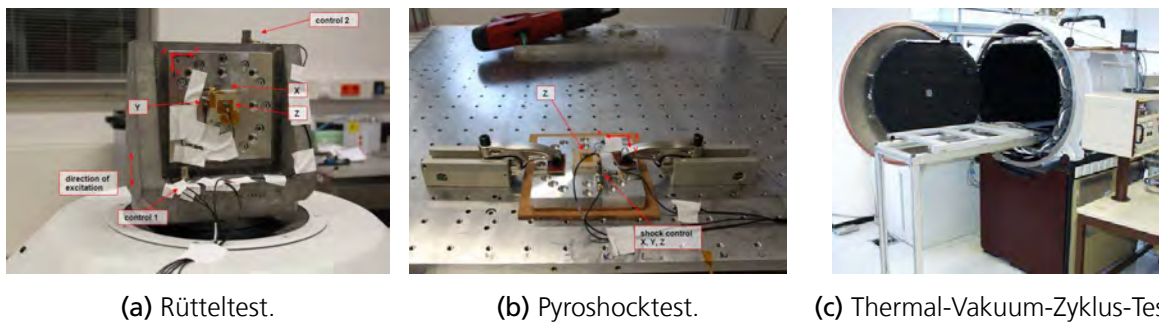
(b) Foto der Rückseite des Arrays mit SMP Steckern.

Abbildung 2.16: Fertigung des 4×4 Multifeed-Arrays für das Demonstrationssystem.



(a) Gewinnverlauf des Elements 1 (Eckelement). (b) Gewinnverlauf des Elements 6 (Mittenelement).

Abbildung 2.17: Gemessener Gewinnverlauf zweier Elemente des 4x4 Multifeed-Arrays.



(a) Rütteltest.

(b) Pyroshocktest.

(c) Thermal-Vakuum-Zyklus-Test.

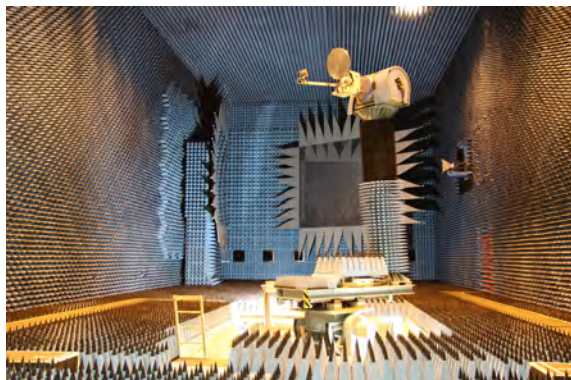
Abbildung 2.18: Raumfahrttauglichkeitstests.

70 MHz herunter zu mischen. Dies ist erforderlich, damit die Signale von der digitalen Hardware verarbeitet werden können. Die Architektur der Frontends ist die eines zweifachen super-heterodyn Empfängers und stellen eine Neuentwicklung dar. Alle Arbeiten einschließlich Fertigung wurden vom Projektpartner SINTEC durchgeführt. Der genaue Aufbau ist in Referenz [Gre+12] beschrieben.

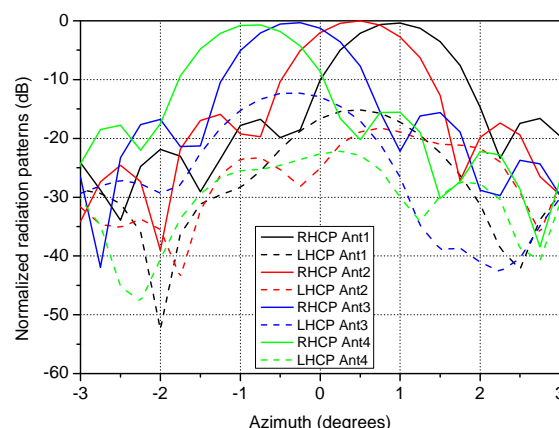
Digitale Hardware

Die digitale Hardware ist eine zentrale Komponente des Empfangssystems. Insgesamt muss sie folgende Aufgaben erfüllen:

1. Kalibrierung des Antennensystems;
2. Strahlformung mit vier Empfangssignalen, Aufbereitung des Ausgangssignals;
3. Ansteuerung der Schaltmatrizen;



(a) Vermessung des Reflektorsystems in einer Compact Range Messanlage des DLR-Instituts für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme.



(b) Gemessene Schwenkeigenschaften des Reflektors. Speisung mit einem Patchelement.

Abbildung 2.19: Vermessung des Reflektors für das Demonstrationssystem.

4. Bereitstellung einer grafischen Benutzeroberfläche zur Bedienung des Systems.

Diese Anforderungen sind auch in Abbildung 2.21 dargestellt. Als Plattform für das Demonstrationssystem dient ein PC mit einem Xilinx® Virtex-4™ FPGA. Da die Virtex-4™ Familie für Weltraumanwendungen zugelassen ist, wird diese Basis die Migration auf ein Zielsystem erleichtern. Das Hardwaredesign auf dem FPGA erfolgte in Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language (VHDL). Neben der Plattform sind noch externe Baugruppen notwendig, auf die später eingegangen wird.

Kalibrierung

Das Kalibrieren des Antennensystems ist eine der wichtigsten Aufgaben. Dabei werden die Laufzeit- und Phasenunterschiede der einzelnen Empfangskanäle ausgeglichen. Durch die dynamische Auswahl verschiedener Antennenelemente während der Laufzeit und die damit verbundene Umschaltung der Signalwege, muss die Möglichkeit gegeben sein, schnell und ohne zusätzliche Geräte zu kalibrieren. Ohne Kalibrierung ergeben sich zufällige Phasenunterschiede zwischen den einzelnen Empfangssignalen, und es wären keine Aussagen bezüglich der Leistungsfähigkeit des Systems möglich, da die Vergleichbarkeit nicht gegeben ist. Daher kommt der Kalibrierung eine entscheidende Rolle zu. Als Anforderungen wurden identifiziert:

- Berücksichtigung der Einflüsse des gesamten Empfangspfads (Reflektor, Array, Schaltmatrizen, Front-Ends, A/D-Wandler, Kabelwege);
- Automatische Kalibrierung ohne manuelle Einzelmessungen;
- Optional: Echtzeitfähigkeit.

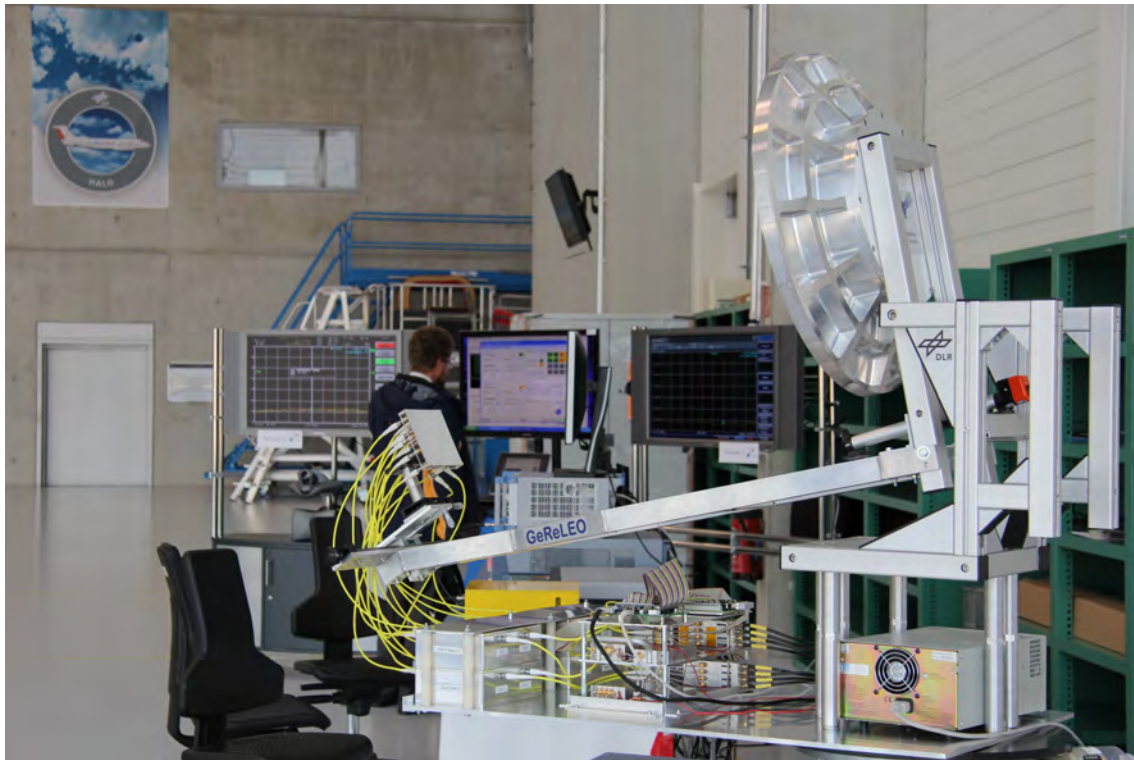


Abbildung 2.20: Foto des Demonstrationssystems.

Für die Kalibrierung wurde das Verfahren der kleinsten Quadrate – Least-Mean-Squares (LMS) – ausgewählt. Dabei wird ein Antennenelement als Referenz ausgewählt. Für alle anderen werden iterativ Kalibrierkoeffizienten berechnet. Der Vorteil dieses Prinzips ist, dass nur die aktuellen Signalwerte benötigt werden, also nichts gespeichert werden muss. Dadurch kann die Kalibrierung so lange dauern bis die gewünschte Präzision erreicht ist. Um die Kalibrierung echtzeitfähig zu gestalten, wurde der LMS Algorithmus in Hardware implementiert. Aufgrund der ohnehin knappen Ressourcen auf dem FPGA stellte dieses Vorgehen eine besondere Herausforderung dar. Einzelheiten werden zukünftigen Publikationen zu entnehmen sein [WD13].

Die Vorteile der Lösung sind wiederum die direkte Übertragbarkeit auf das Zielsystem. Da keine externen Berechnungen erfolgen müssen und keine Software beteiligt ist, kann das Design ohne große Änderungen weiterverwendet werden. Die Umsetzung in Hardware zeichnet sich zudem durch eine gewisse Robustheit aus, bietet aber über eingebaute Parameter ausreichende Flexibilität, um auch auf sich ändernde Anforderungen reagieren zu können. Insbesondere können Schrittweite und Anzahl der Iterationen sowie das Referenzsignal eingestellt werden. Dies sind die Schlüsselp Parameter des LMS Algorithmus [Hay01].

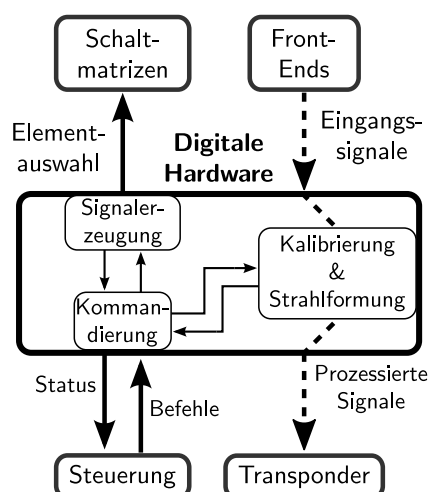


Abbildung 2.21: Übersicht über die digitale Hardware mit Schnittstellen.

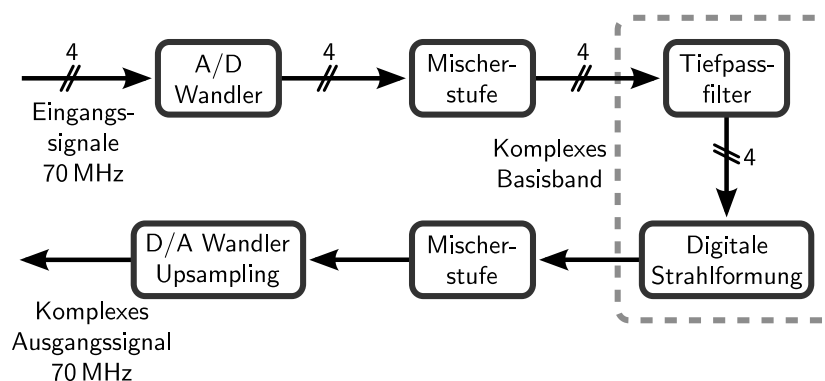


Abbildung 2.22: Flussdiagramm des Signalverarbeitungspfades.

Strahlformung und Signalverarbeitung

Der Teil, der die meisten Hardwareressourcen auf dem FPGA benötigt, ist die Signalverarbeitung inklusive der Strahlformung. Die Anforderungen sind

- Entgegennahme von vier reellen, analogen Eingangssignalen;
- Trennung von Inphase- und Quadraturanteil;
- Digitale Strahlformung mit gegebenen Koeffizienten;
- Ausgabe eines komplexen Ausgangssignal bei 70 MHz.

Das Flussdiagramm des Signalpfades ist in Abbildung 2.22 dargestellt. Die vier Eingangssignale mit 70 MHz Mittenfrequenz werden zunächst digitalisiert. Da die FPGA Einheit mit einer Taktfrequenz von 104 MHz arbeitet, findet dabei ein Bandpass-Sampling statt. Dies hat zur Folge, dass die digitalen Signale nunmehr eine Mittenfrequenz von 34 MHz haben.

Eine digitale Mischerstufe transferiert die Signale ins Basisband und separiert dabei Inphase- und Quadraturanteil. Die entstandenen komplexen Signale werden mit einem Tiefpass gefiltert, um Mischprodukte zu eliminieren. Anschließend erfolgt die digitale Strahlformung mit komplexen Koeffizienten. Diese werden vom Benutzer eingegeben bzw. vom Kalibrieralgorithmus berechnet. Über eine weitere Mischerstufe und einen D/A-Wandler wird das entstandene komplexe Ausgangssignal wieder auf die Zwischenfrequenz von 70 MHz gebracht. Aufgrund der oben genannten Taktfrequenz ist zum Erreichen dieser Frequenz ein Upsampling im D/A-Wandler notwendig. Eine detaillierte Beschreibung des Signalpfads und Messergebnisse ist in Referenz [Gre+12] zu finden.

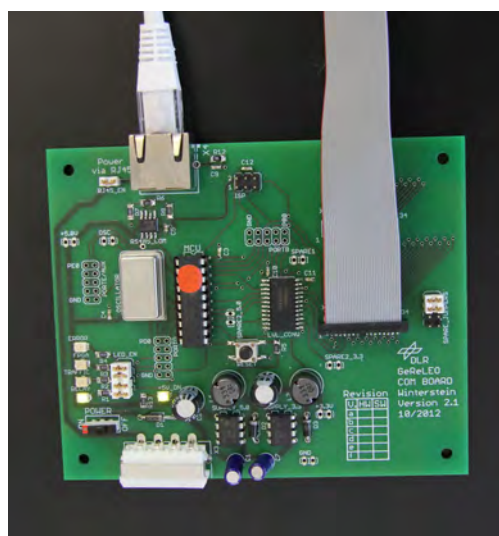
Schaltmatrixsteuerung

Um die Multibeam-Fähigkeit des Antennensystems zu zeigen, ist es notwendig zwischen verschiedenen Kombinationen von Arrayelementen umschalten zu können. Diese Funktionalität wird durch die Schaltmatrizen bereitgestellt. Die Umschaltung muss jedoch von der digitalen Hardware ausgelöst werden. Für die Ansteuerung der Matrizen ist dabei eine große Anzahl von Logiksignalen erforderlich, nämlich ein Signal pro eingebautem HF Schalter. Im Demonstrationssystem kommen 80 Schalter zum Einsatz. Die folgenden Anforderungen sind für die Umschaltung erforderlich:

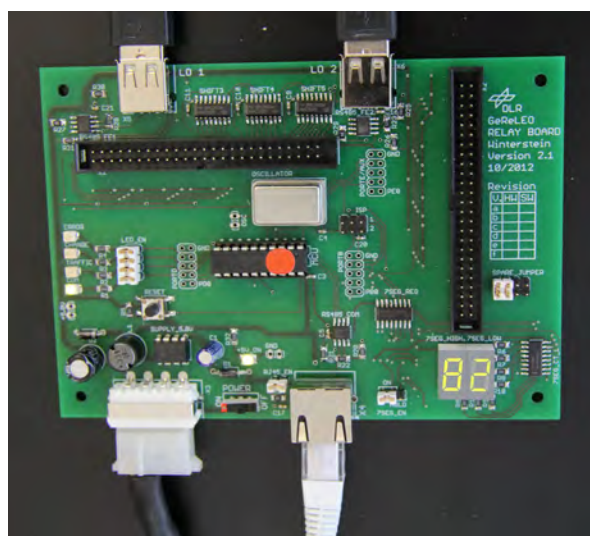
- Generierung der notwendigen Logiksignale zur Steuerung der Schaltmatrizen;
- Gleichzeitiges Umschalten aller Pfade ermöglichen;
- Sichere Übertragung der Signale vom FPGA zum Antennensystem (nur Demonstrator).

Die direkte Implementierung der erforderlichen Steuerlogik im FPGA ist nicht möglich. Zum einen ist die verfügbare Logikspannung von 3.3 V zu niedrig für eine Übertragung über längere Strecken. Zum anderen reicht die Zahl der I/O-Pins des Gerätes nicht aus, um die geforderte Menge an Signalen parallel zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund wurden zwei Platinen entwickelt, die in Abbildung 2.23 zu sehen sind. Die COM-Platine befindet sich am FPGA und wird mit Hilfe eines 34-poligen Bandkabels mit 1.25 mm Raster angeschlossen (rechts zu sehen). Der FPGA kommuniziert über eine Serial-Parallel Interface (SPI) Verbindung mit dem Mikrocontroller (Microcontroller Unit, MCU) auf der COM-Platine. Dieser erkennt die empfangenen Signale und setzt sie in Befehle um. Diese werden in einem RS-485 Transceiver gewandelt und als differentielle Signale über ein Ethernet-Kabel (weißer Stecker) an die RELAY-Platine weitergeleitet. Im Demonstrationssystem wird die COM-Platine über diese Verbindung mit Spannung versorgt. Dies erübrigt ein Labornetzteil, das aber für eigenständige Tests der Baugruppe am Molexstecker (unten) angeschlossen werden kann.

Auf der RELAY-Platine findet die Decodierung der empfangenen Befehle statt. Die Logiksignale zum Ansteuern der Schaltmatrizen werden von einem Mikrocontroller generiert. Über eine Kette von Schieberegistern werden die Signale seriell geladen und anschließend gleichzeitig auf die beiden 50-poligen Stecker gegeben. Durch diesen Multiplex kann die erforderliche Anzahl an Aus-



(a) COM-Platine.



(b) RELAY-Platine.

Abbildung 2.23: Platinen für die Befehlsübermittlung zwischen FPGA und Antennensystem.

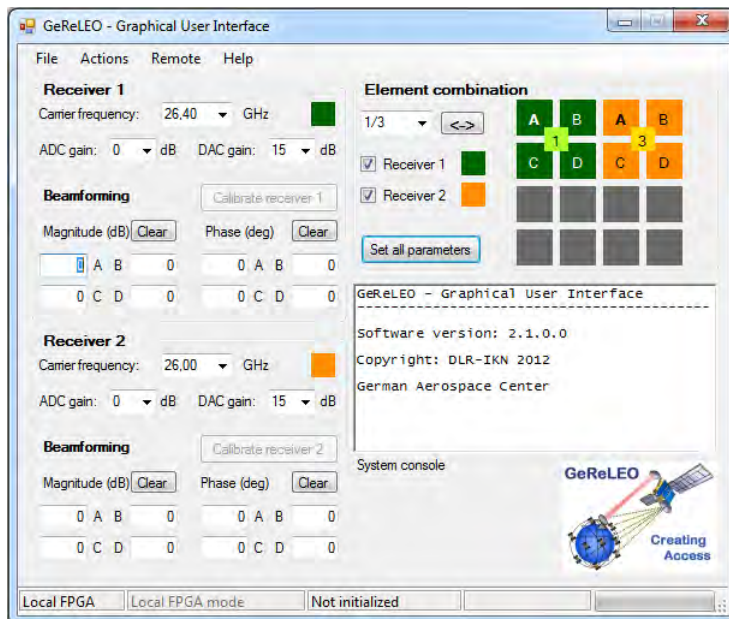
gangspins zur Verfügung gestellt werden. Durch die einfache Aneinanderreihung von Registern ist diese Lösung fast beliebig erweiterbar, insbesondere auch im Hinblick auf ein Zielsystem mit wesentlich mehr Schaltzuständen. Aus den Logiksignalen werden schließlich die Schaltsignale von 90 V erzeugt und an die Schaltmatrix weitergeleitet. Zur Visualisierung wird die aktuell geschaltete Kombination auf den beiden 7-Segmentanzeigen in der unteren rechten Ecke dargestellt. Die Anzeige entspricht der Codierung, die auch in der grafischen Benutzungsoberfläche verwendet wird. An der Oberseite der Platine befinden sich zwei USB-Buchsen, die mit den abstimmbaren lokalen Oszillatoren der Front-Ends verbunden sind. Mittels RS-485 Verbindungen werden die Ausgangsfrequenzen eingestellt und somit die Kanäle der beiden Empfangspfade ausgewählt.

Grafische Benutzungsoberfläche

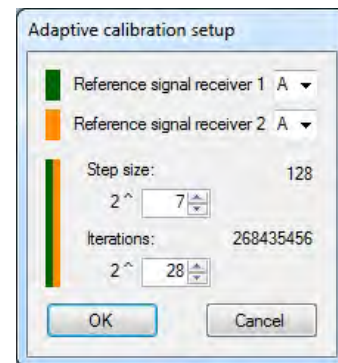
Die grafische Benutzungsoberfläche dient der Steuerung der digitalen Hardware über einen PC. Besondere Anforderungen sind

- Auswahl der zum Empfang genutzten Antennenelemente;
- Einstellung von Verstärkung und Mischfrequenzen der Empfängerpfade;
- Eingabe der Strahlformungskoeffizienten;
- Auslösen der Kalibrierung;
- Kommunikation mit dem FPGA.

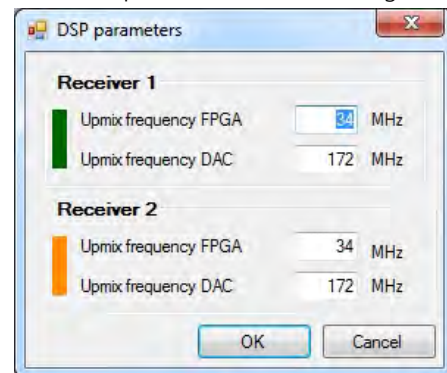
Die Benutzungsoberfläche wurde in Visual Basic programmiert, die einzelnen Bestandteile sind in Abbildung 2.24 dargestellt. Im Hauptfenster (Abbildung 2.24a) werden rechts oben die aktiven Antennenelemente für die beiden Empfänger ausgewählt (element combination). Auf der linken



(a) Hauptfenster der Benutzeroberfläche.



(b) Optionen zur Kalibrierung.



(c) Optionen zur Signalverarbeitung.

Abbildung 2.24: Fenster der grafischen Benutzeroberfläche.

Seite können für jeden Empfängerpfad spezifische Einstellungen vorgenommen werden. Dazu gehört die Auswahl der Trägerfrequenz sowie die Verstärkung der A/D- und D/A-Wandler im Signalpfad. Auch die manuelle Eingabe oder Anpassung von Strahlformungskoeffizienten sowie das Starten der Kalibrierung erfolgt hier. Das Verhalten des Kalibrieralgorithmus kann in einem separaten Optionsfenster (Abbildung 2.24b) angepasst werden. Dieses wird über die Menüleiste im Hauptfenster aufgerufen. Es ermöglicht die Auswahl des Referenzelements sowie Veränderung der Schrittweite des LMS und der Anzahl an Iterationen während des Kalibriervorgangs. Die Mischfrequenzen werden in einem zweiten Optionsfenster (Abbildung 2.24c) eingestellt. Dies dient der Anpassung der Ausgangssignale. Diese können beispielsweise auf andere Mittenfrequenzen als 70 MHz gemischt oder auch spektral gespiegelt werden.

Die Ankopplung an die FPGA-Einheit erfolgt über ein Application Programming Interface (API), das vom Hersteller der Hardwareplattform bereitgestellt wird. Die Programmierung findet dabei in C++ statt. Die Übermittlung von Befehlen geschieht durch das Schreiben von Werten in spezielle Register des FPGA. Diese beeinflussen dann das Verhalten der programmierten Hardware entsprechend, indem z.B. neue Koeffizienten für die Strahlformung übernommen werden oder die Kalibrierung angestoßen wird.

Tabelle 2.3: Bewilligte Positionen laut Zuwendungsbescheid vom 28.09.2009 und tatsächliche Ausgaben (jeweils in Euro).

Position	Bezeichnung	bewilligt	tatsächlich
0813	Material	26 000,00	27 915,63
0823	FE-Fremdleistungen	99 895,00	99 895,00
0837	Personalkosten	1 555 948,72	1 528 407,94
0838	Reisekosten	30 260,00	18 933,26
0847	vorhabenspezifische Abschreibungen	122 110,00	92 448,47
0850	sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	39 020,00	58 620,68
0856	Kosten innerbetrieblicher Leistungen	82 986,63	66 046,56
	Summe	1 956 220,35	1 892 267,54

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 2.3 zeigt die bewilligten Positionen laut dem Zuwendungsbescheid vom 28.09.2009 sowie die tatsächlichen Ausgaben.

Die angegebenen Positionen untergliedern sich grob wie folgt:

Material: Kabel, Gehäuse, Platinen, Stecker, Werkstattmaterial etc.

FE-Fremdleistungen: Unterauftrag Astrium.

Personalkosten: Wissenschaftliche Mitarbeiter Kategorie I.

Reisekosten: Projekttreffen, Erprobungen, Konferenzen.

Vorhabenspezifische Abschreibungen: Block Upconverter Ka-Band, Up/Down Converter, Einbaurack und 19" Rechnersysteme, FPGA Digital Signal Processor (DSP) Boards, Signalgenerator, Reflektorantenne mit Feed, Simulationsrechner, Referenzoszillatormodule etc.

Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten: Antennenvermessung, Literatur, Büro- und DV-Bedarf etc.

Kosten innerbetrieblicher Leistungen: Konstruktion und Fertigung eines Antennenreflektors mit Feedhalterung (siehe Abbildung 2.20)

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

2.4.1 Wissenschaftlicher Nutzen

Für DLR-KN ergeben sich Verwertungsmöglichkeiten durch die Generierung von Intellectual Property Rights (IPRs), Veröffentlichungen, und durch Beiträge zur Standardisierung (z.B. bei CCSDS). Mit der Entwicklung der neuen Zugriffs- und der kanaladaptiven Übertragungsverfahren werden effizientere und gleichzeitige robustere Übertragungsverfahren für GEO Datenrelais entwickelt. Das Know-How auf diesem Gebiet kann dadurch deutlich gesteigert werden. Dies bereitet wiederum den Weg für eine künftige Mitgestaltung der Kommunikationseinrichtungen von LEO Satelliten. Die Entwicklungen könnten insbesondere im Rahmen der nationalen Telekommunikationsmission eingesetzt und verifiziert werden.

Die Kombination eines Reflektors mit einem Antennenarray, dessen Eigenschaften über eine Schaltmatrix und durch digitale Strahlformung gesteuert werden, ist eine Erfindung von DLR-KN und wurde zum Patent angemeldet [DG08]. Aufgrund der Neuartigkeit dieser Konfiguration ergeben sich eine Reihe von Fragestellungen, die insbesondere die Möglichkeiten und Grenzen der hochratigen Datenübertragung sowie der Satellitenverfolgung und Störerunterdrückung betreffen. Sie bilden die Grundlage für weitere wissenschaftliche Untersuchungen sowie Entwicklungen von Verfahren und Technologien, die entsprechende Veröffentlichungen und Erfindungsmeldungen ermöglichen. DLR-KN wird dadurch in die Lage versetzt, eine führende Position auf diesem Gebiet einzunehmen.

2.4.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Heutige niedrigfliegende Satelliten der Erdbeobachtung und der Kommunikation können ihre Daten nur während des Überflugs von Bodenstationen zur Erde senden. Dies bedeutet hohe Kosten für das Bodennetzwerk, Datenstaus auf den Satelliten und Verzögerungen in der Verfügbarkeit der Daten. Der neue Ansatz erlaubt es aus dem geostationären Orbit heraus diese Daten zu bündeln und an einer oder lediglich wenigen Bodenstationen zur Verfügung zu stellen.

Dieser Ansatz und die dafür zu entwickelnden Verfahren dürften ein wichtiges Element im Aufbau eines deutschen industriellen Engagements in der Satellitenkommunikation sein. Letztere muss sich differenzieren von den klassischen transparenten geostationären Systemen, die bereits Überkapazitäten aufweisen.

Die zu entwickelnden Technologien sind Konkurrenztechnologien aus folgenden Gründen überlegen:

- Es können mit verhältnismäßig geringem Aufwand GEO Datenrelais für mehrere LEO Satelliten gleichzeitig realisiert werden. Insbesondere wird im GEO Satelliten keine mechanische Nachführung und nur ein starrer Antennenreflektor benötigt.
- Die zu entwickelnden Übertragungsverfahren für die GEO Datenrelais sind kanaladaptiv und damit sehr bandbreiteneffizient und robust.
- Die Technologien werden für das künftig im Satellitenbereich immer mehr eingesetzte Ka-Band entwickelt.
- Ein kostspieliges weltweites Bodenstationsnetzwerk wird durch die GEO Datenrelais eingespart.

Mögliche deutsche Nutzer der GEO Datenrelais sind:

German Space Operations Center (GSOC): Das GSOC hat vorwiegend einen Bedarf an GEO Datenrelais für TT&C Verbindungen von/zu mehreren LEO Satelliten

Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD): Das DFD hat vorwiegend einen Bedarf an GEO Datenrelais für hochratige Datenverbindungen von mehreren Erdbeobachtungssatelliten

Astrium Services: Neben dem Bedarf an Relaisverbindungen zwischen LEO und GEO Satelliten ergibt sich hier noch ein möglicher zukünftiger Bedarf an GEO Datenrelaisfunktionen zu Flugzeugen – z.B. unbemannte Aufklärungsflugzeuge (UAVs) im Rahmen von Erderkundung, Katastropheneinsätzen oder militärischen Anwendungen – um eine direkte Übertragung der Beobachtungs- und TT&C-Daten von/zur Kontrollstation zu ermöglichen.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt

Auf dem Gebiet des Vorhabens ist dem Zuwendungsempfänger während der Projektlaufzeit kein anderer Fortschritt bekannt geworden.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

2.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

Referenzen [Kat+10; Kat+12; KG11; Kat12b] sind keine Veröffentlichungen, sondern projektinterne Zusammenfassungen der jeweiligen Arbeitspakete. Sie werden hier nur der Vollständigkeit wegen gelistet.

- [DG08] Achim Dreher und Christoph Günther. "Reflektorantenne, insbesondere zum Empfangen und/oder Aussenden von Signalen von und/oder hin zu Satelliten". Dt. Patentanmeld. 10 2008 057 088.5-55 (DE). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. 13. Nov. 2008.
- [GD11] Lukasz Greda und Achim Dreher. "Beamforming Capabilities of Array-fed Reflector Antennas". In: *5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Apr. 2011.
- [Gre+10a] Lukasz Greda, Bernhard Knüpfer, Marcos Vinicio Thomas Heckler, J. Sebastian Knogl, Hermann Bischl, Achim Dreher und Christoph Günther. "A Satellite Multibeam Antenna for High-Rate Data Relays". In: *32nd ESA Antenna Workshop on Challenges for Space Antenna Systems*. Okt. 2010.
- [Gre+10b] Lukasz Greda, Bernhard Knüpfer, J. Sebastian Knogl, Marcos Heckler, Hermann Bischl und Achim Dreher. "A multibeam antenna for data relay for the German communication satellite Heinrich-Hertz". In: *4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Apr. 2010.
- [Gre+11] Lukasz Greda, Zoltán Katona, Bernhard Knüpfer, Wahid Elmarissi und Achim Dreher. "Development of a Satellite Multibeam Antenna for High-Rate Data Relays: Current Status". In: *33rd ESA Antenna Workshop on Challenges for Space Antenna Systems*. Okt. 2011.
- [Gre+12] Lukasz Greda, Andreas Winterstein, Achim Dreher und Martin Brück. "Demonstrator Concept for a Satellite Multiple-Beam Antenna for High-Rate Data Relays". In: *6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*. Sep. 2012, S. 96–100.
- [Kat+10] Zoltán Katona, Bernhard Knüpfer, J. Sebastian Knogl und Frieder Heckmann. *GeReLEO AP 2000 – Systemarchitektur*. Technical Note. Confidential. Okt. 2010.
- [Kat+12] Zoltán Katona, Bernhard Knüpfer, Frieder Heckmann und Ronald Boehnke. *GeReLEO AP 3000 – Development of New Multiple Access and Transmission Schemes*. Technical Note. Confidential. Okt. 2012.
- [Kat12a] Zoltán Katona. "GEO Data Relay for Low Earth Orbit Satellites". In: *6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*. Sep. 2012, S. 81–88.
- [Kat12b] Zoltán Katona. *GeReLEO AP 5000 – Implementierung der neuen Zugriffs- und Übertragungsverfahren*. Technical Note. Confidential. Aug. 2012.
- [KG11] J. Sebastian Knogl und Lukasz Greda. *GeReLEO AP 4000 – Entwicklung des Multibeam Antennensystems*. Technical Note. Confidential. Aug. 2011.

2.6.2 Präsentationen und Messen

- [Don+12] Anton Donner, Hermann Bischl, Achim Dreher, Lukasz Greda und Zoltan Katona. *Entwicklung von kanaladaptiven Übertragungsverfahren und Multibeam-Antennen für GEO-Datenrelais*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), März 2012.
- [Knü+10] Bernhard Knüpfer, Hermann Bischl, Achim Dreher, Lukasz Greda, Zoltan Katona und J. Sebastian Knogl. *GeReLEO - GEO Datenrelais für niedrigfliegende (LEO) Satelliten*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), März 2010.

2.6.3 Diplom- und Masterarbeiten

- [Man11] Alessio Mancini. *Development of patch antenna with high gain for space applications*. Diplomarbeit. Jan. 2011.

2.6.4 Geplante Veröffentlichungen

- [Don13] Anton Donner et al. *Geostationäre Datenrelaissatelliten für die Erdbeobachtung: Das GeReLEO Systemkonzept*. In preparation. 2013.
- [Gre+13] Lukasz A. Greda, Andreas Winterstein, Achim Dreher, Sascha Figur, Bernhard Schoenlinner, Volker Ziegler, Marco Hauboldt und Martin Brueck. "A Satellite Multiple-Beam Antenna for High-Rate Data Relays". In: (Aug. 2013). In preparation.
- [Kat+13] Zoltán Katona, Lukasz Greda, Anton Donner, Hermann Bischl, Achim Dreher und Christoph Günther. "Advanced Satellite Relaying System". In: (2013). In preparation.
- [WD13] Andreas Winterstein und Achim Dreher. *Hardware implemented adaptive calibration algorithms for antenna arrays*. In preparation. 2013.

Abkürzungsverzeichnis

8-PSK	8-Phase-Shift Keying
ACM	Adaptive Coding and Modulation
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast
AIS	Automatic Identification System
AOS	Advanced Orbiting Systems
API	Application Programming Interface
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
CER	Codeword Error Rate
DFD	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
DLR-KN	DLR-Institut für Kommunikation und Navigation
DRA	Direct Radiating Array
DSP	Digital Signal Processor
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-S2	Digital Video Broadcasting – Satellite – Second Generation
DVB-RCS2	Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite – Second Generation
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EDRS	European Data Relay Satellite System
ESA	European Space Agency
FEC	Forward Error Correction
FPGA	Field Programmable Gate Array
GEO	Geostationary Earth Orbit
GSOC	German Space Operations Center
GUI	Graphical User Interface
HF	Hochfrequenz
IP	Internet Protocol
IPR	Intellectual Property Right
IZR	Steinbeis-Innovationszentrum Raumfahrt
LDPC	Low-Density-Parity-Check
LEO	Low Earth Orbit
LMS	Least-Mean-Squares
LNA	Low Noise Amplifier

MAC	Media Access Control
MCU	Microcontroller Unit
MEMS	Microelectromechanical Systems
MF-TDMA	Multi-Frequency Time Division Multiple Access
ModCod	Modulation und Codierung
NCC	Network Control Center
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PL	Physical Layer
PLS	Physical Layer Signalling
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAT	Resource Allocation Table
RF	Radio Frequency
RLE	Return Link Encapsulation
SE	Spectral Efficiency
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SMP	Sub-Miniature-Push-On
SPI	Serial-Parallel Interface
TDM	Time-Division Multiplexing
TT&C	Telemetry, Tracking and Command
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UHF	Ultra-High Frequency
USB	Universal Serial Bus
VCM	Variable Coding and Modulation
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

Literaturverzeichnis

- [CCS07] CCSDS. *Overview Of Space Communications Protocols*. Dez. 2007.
- [DG08] Achim Dreher und Christoph Günther. "Reflektorantenne, insbesondere zum Empfangen und/oder Aussenden von Signalen von und/oder hin zu Satelliten". Dt. Patentanmeld. 10 2008 057 088.5-55 (DE). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. 13. Nov. 2008.
- [ETS05] ETSI. *Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications*. März 2005.
- [ETS11] ETSI. *Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System; Part 2: Lower Layers for Satellite standard*. März 2011.
- [Fig+12a] Sascha A. Figur, Erika Meniconi, Ulrich Prechtel, Volker Ziegler, Bernhard Schoenlinner, Roberto Sorrentino und Larissa Vietzorreck. "Design and characterization of a simplified planar 16×8 RF MEMS switch matrix for a GEO-stationary data relay". In: *Microwave Conference (EuMC), 2012 42nd European*. Nov. 2012, S. 1059–1062.
- [Fig+12b] Sascha A. Figur, Bernhard Schoenlinner, Ulrich Prechtel, Larissa Vietzorreck und Volker Ziegler. "Simplified 16×8 RF MEMS switch matrix for a GEO-stationary data relay". In: *Microwave Conference (GeMiC), 2012 The 7th German*. März 2012, S. 1–4.
- [GD11] Lukasz Greda und Achim Dreher. "Beamforming Capabilities of Array-fed Reflector Antennas". In: *5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Apr. 2011.
- [Gre+10a] Lukasz Greda, Bernhard Knüpfer, Marcos Vinicio Thomas Heckler, J. Sebastian Knogl, Hermann Bischl, Achim Dreher und Christoph Günther. "A Satellite Multibeam Antenna for High-Rate Data Relays". In: *32nd ESA Antenna Workshop on Challenges for Space Antenna Systems*. Okt. 2010.
- [Gre+10b] Lukasz Greda, Bernhard Knüpfer, J. Sebastian Knogl, Marcos Heckler, Hermann Bischl und Achim Dreher. "A multibeam antenna for data relay for the German communication satellite Heinrich-Hertz". In: *4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Apr. 2010.
- [Gre+12] Lukasz Greda, Andreas Winterstein, Achim Dreher und Martin Brück. "Demonstrator Concept for a Satellite Multiple-Beam Antenna for High-Rate Data Relays". In: *6th*

- Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*. Sep. 2012, S. 96–100.
- [Hay01] Simon S. Haykin. *Adaptive Filter Theory*. 4. Aufl. Prentice Hall International, 2001.
- [Kat+10] Zoltán Katona, Bernhard Knüpfer, J. Sebastian Knogl und Frieder Heckmann. *GeReLEO AP 2000 – Systemarchitektur*. Technical Note. Confidential. Okt. 2010.
- [Kat+12] Zoltán Katona, Bernhard Knüpfer, Frieder Heckmann und Ronald Boehnke. *GeReLEO AP 3000 – Development of New Multiple Access and Transmission Schemes*. Technical Note. Confidential. Okt. 2012.
- [Kat12a] Zoltán Katona. “GEO Data Relay for Low Earth Orbit Satellites”. In: *6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*. Sep. 2012, S. 81–88.
- [Kat12b] Zoltán Katona. *GeReLEO AP 5000 – Implementierung der neuen Zugriffs- und Übertragungsverfahren*. Technical Note. Confidential. Aug. 2012.
- [KG11] J. Sebastian Knogl und Lukasz Greda. *GeReLEO AP 4000 – Entwicklung des Multi-beam Antennensystems*. Technical Note. Confidential. Aug. 2011.
- [Man11] Alessio Mancini. *Development of patch antenna with high gain for space applications*. Diplomarbeit. Jan. 2011.
- [Men+11] E. Meniconi, B. Schoenlinner, U. Prechtel, J. Hartmann, R. Sorrentino und V. Ziegler. “Broadband RF-MEMS based switching network for automated measurements of multifeed antennas”. In: *Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2011 European*. Okt. 2011, S. 676–679.
- [WD13] Andreas Winterstein und Achim Dreher. *Hardware implemented adaptive calibration algorithms for antenna arrays*. In preparation. 2013.